

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství**

**Zařízení pro simulaci jízdních profilů automobilů za účelem
testování hladinových senzorů**

**Device for the Simulation of Drive Profiles Vehicles for Testing
Level Sensors**

2018

Daniel Novický

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Daniel Novický**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma: Zařízení pro simulaci jízdních profilů automobilů za účelem testování
hladinových senzorů
Device for the Simulation of Drive Profiles Vehicles for Testing
Level Sensors

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor problematiky simulace zrychlení a náklonu.
2. Výběr komponent a definice mezních parametrů přípravku pro simulaci jízdních profilů automobilů.
3. Návrh řešení řídicího softwaru a mechanické konstrukce přípravku.
4. Realizace přípravku pro simulaci jízdních profilů automobilů.
5. Implementace řídicího softwaru.
5. Kalibrace, verifikace a testování.
6. Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Technická diagnostika - senzory, metody, analýza signálu. ISBN 80-730-0158-6.
- [2] BERGER, Arnold. *Embedded systems design*. Vyd. 1. Lawrence: CMP Books, c2002, 237 s. ISBN 1-57820-073-3.
- [3] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI LabVIEW for CompactRIO Developer's Guide* [online]. National Instruments, 2014 [cit. 2017-01-19]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/products/us/fullcriodevguide.pdf>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jan Žídek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 30. 4. 2018



podpis studenta

Prohlášení zástupce spolupracující právnické nebo fyzické osoby

„Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.“

V Ostravě dne 30. 4. 2018



Ing. Radim Hercík, Ph.D.

Poděkování

Rád bych poděkoval zaměstnancům firmy Continental Automotive Czech Republic s.r.o., obzvláště Ing. Radimovi Hercíkovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultaci při tvorbě diplomové práce, dále bych rád poděkoval vedoucímu mé práce doc. Ing. Janu Žídkovi, CSc.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem testovacího přípravku pro simulaci jízdních podmínek ultrasonického senzoru umístěného v nádrži s roztokem syntetické močoviny v osobním nebo užitkovém automobilu využívající technologii pro redukci emisí NOx pomocí principu selektivní katalytické redukce.

Hlavním účelem práce je popsání a rozpoznání problémů vznikajících při použití ultrazvukového měření hustoty a výšky hladiny kapaliny. Z výsledků problematiky a nastavených požadavků pro tvorbu přípravku jsou navrženy možné řešení mechanické konstrukce pro simulaci inklinace kapaliny. Další část práce se zabývá použitím elektroniky včetně napájení a řízení akčních členů. Grafické rozhraní a řídicí funkce jsou navrženy v graficky orientovaném programovacím softwaru LabVIEW.

Klíčová slova

MCU, LabVIEW, ultrasonický senzor pro měření koncentrace a výšky hladiny kapaliny, servomotor, urea, AdBlue, grafické rozhraní, sériová komunikace

Abstract

This thesis describes the developing process of the test device for a simulation driving condition of an ultrasonic sensor. The sensor is located in a AdBlue stack in the personal or a commercial vehicle equipped the technology for reduce the emission of NO_x using the principles of Selective Catalytic Reduction.

The main purpose of this thesis is described and recognize problems emerged with using the ultrasonic measuring of a liquid density and level. From the investigation result and specified requirements is suggested a possible solution for a mechanical simulation tilt of the liquid. In the next part is described the mechanical solution self with the necessary calculation for required output power of actuators. The last part is dealing with the electrotechnical part including the power supply and controlling the actuator. The main graphical interface and partial controlling function are develop in the graphical programing language using the LabVIEW software.

Key words

MCU, LabVIEW, ultrasonic liquid level and liquid concentration sensor, servomotor, urea, AdBlue, graphical interface, serial communication

Obsah

Úvod.....	- 5 -
1 Continental Automotive Czech Republic s.r.o.	- 6 -
2 Rozbor problematiky.....	- 7 -
2.1 Měření hladiny kapaliny ultrazvukovým signálem	- 9 -
2.2 Měření koncentrace kapaliny ultrazvukovým signálem.....	- 11 -
2.3 Problémy s měřením ultrazvuku v dopravním prostředku	- 13 -
2.4 Simulace podmínek automobilu.....	- 15 -
3 Návrh hardwarové části přípravku	- 16 -
3.1 Simulace teploty.....	- 16 -
3.2 Simulace přetížení, náklonu	- 17 -
3.2.1 XY polohování	- 17 -
3.2.2 3DOF polohování	- 18 -
3.2.3 Polohování na kulovém čepu.....	- 19 -
3.2.1 Zvolené řešení	- 20 -
3.3 Navržená konstrukce.....	- 21 -
3.3.1 Testovací nádobka se senzorem	- 23 -
3.3.2 Pákový převod.....	- 23 -
3.3.3 Uchycení testovací nádoby	- 25 -
3.4 Řízení, akční členy	- 26 -
3.4.1 Servomotor	- 26 -
3.4.2 Řízení servomotoru	- 27 -
3.4.3 Výpočty servomotoru	- 27 -
3.4.4 Volba servomotoru	- 29 -
3.5 Elektronika	- 30 -
3.6 Finální provedení přípravku.....	- 32 -
4 Návrh softwarové části.....	- 33 -
4.1 Návrh kódu pro mikroprocesor	- 33 -
4.1.1 Komunikační vrstva.....	- 34 -
4.1.2 Verifikace softwaru	- 35 -
4.2 Návrh kódu v prostředí LabVIEW	- 36 -
4.3 Kalibrace pohybů	- 38 -
4.4 Grafické rozhraní	- 39 -
4.5 Návrh automatických sekvencí pohybu	- 40 -
5 Zhodnocení dosažených výsledků.....	- 41 -
6 Závěr	- 42 -
Použitá literatura	- 43 -
Seznam příloh.....	- 44 -

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<i>ASCII</i>	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
<i>CAN</i>	<i>Controller Area Network</i>
<i>CMD</i>	<i>Command</i>
<i>ECU</i>	<i>Engine Control Unit</i>
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>
<i>HW</i>	<i>Hardware</i>
<i>ID</i>	<i>Identification</i>
<i>MCU</i>	<i>Micro Control Unit</i>
<i>MSB</i>	<i>Most Significant Bit</i>
<i>NTC</i>	<i>Negative Temperature Coefficient Thermistor</i>
<i>LSB</i>	<i>Least Significant Bit</i>
<i>SCR</i>	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
<i>SW</i>	<i>Software</i>
<i>TTL</i>	<i>Transistor–Transistor Logic</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>

Seznam použitých termínů

Termín	Význam termínu
<i>AdBlue</i>	<i>Obchodní název pro 32,5 % koncentrát syntetické močoviny</i>
<i>Bajt</i>	<i>1 Bajt = 8bitů</i>
<i>Bit</i>	<i>Informace vyjádřená pomocí logické nuly nebo jedničky</i>
<i>RAW</i>	<i>Data v základním hexadecimálním tvaru</i>
<i>RS323</i>	<i>Komunikační rozhraní sériové linky</i>
<i>Urea</i>	<i>Roztok koncentráту močoviny (32,5%)</i>
<i>VI</i>	<i>Funkce, podprogramy vytvořené v prostředí LabVIEW</i>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Sídlo vývojového centra firmy Continental s.r.o. Ostrava – Hrabová [6]	- 6 -
Obrázek 2 Emisní systém vznětového agregátu [7]	- 8 -
Obrázek 3 Umístění emisního systému v útrokách automobilu [7]	- 8 -
Obrázek 4 Princip měření hladiny pomocí ultrazvukového signálu [9].....	- 9 -
Obrázek 5 Vyhodnocovací elektronika pro zpracování ultrasonického signálu [9].....	- 10 -
Obrázek 6 Závislost rychlosti zvuku na koncentraci kyseliny sírové [10].....	- 11 -
Obrázek 7 Vyhodnocovací obvod měření rychlosti zvuku v kapalině [10].....	- 12 -
Obrázek 8 Ideální měření hladiny pomocí ultrazvukového signálu	- 13 -
Obrázek 9 Chování ultrasonického signálu při inklinaci kapaliny v nádrži.....	- 14 -
Obrázek 10 Topené těleso pro výhřev kapaliny v nádobce.....	- 16 -
Obrázek 11 XY polohování pomocí dvou lineárních posuvů	- 17 -
Obrázek 12 Zařízení pro 3DOF polohování [11]	- 18 -
Obrázek 13 Princip náklonu nádoby na kulovém čepu pomocí páky servomotoru	- 19 -
Obrázek 14 3D vizualizace navržené konstrukce z hliníkových profilů.....	- 21 -
Obrázek 15 Rozměry použitých hliníkových profilů [12]	- 22 -
Obrázek 16 Použitý kulový čep pro náklon testovací nádoby [13].....	- 22 -
Obrázek 17 Navržená testovací nádoba s integrovaným senzorem	- 23 -
Obrázek 18 Pákový převod pomocí dvou pohyblivých bodů pro polohování nádoby v ose X	- 24 -
Obrázek 19 Pákový převod pomocí tří pohyblivých bodů pro polohování nádoby v ose Y.....	- 24 -
Obrázek 20 Vizualizace 3D modelu pro uchycení testovací nádoby	- 25 -
Obrázek 21 Řez servomotorem s popisem dílčích částí [14]	- 26 -
Obrázek 22 Princip řízení servomotoru pomocí střidy PWM signálu	- 27 -
Obrázek 23 Popis jednotlivých parametrů na teoretickém schématu.....	- 28 -
Obrázek 24 Servomotor SPMSH6200 Spektrum [15]	- 29 -
Obrázek 25 Schéma znázorňující propojení HW částí systému.....	- 30 -
Obrázek 26 Elektronika umístěna uvnitř krabičky.....	- 31 -
Obrázek 27 Napájecí rozhraní zařízení	- 31 -
Obrázek 28 Výsledná konstrukce.....	- 32 -
Obrázek 29 Schéma propojení dílčích softwarových částí	- 33 -
Obrázek 30 Stavový diagram kódu mikroprocesoru.....	- 33 -
Obrázek 31 Příklad zaslání znaku „A“ pomocí sériové linky s užitím kontroly paritou [17]	- 34 -
Obrázek 32 Kontrola délky pulzu servomotoru pro středovou polohu	- 35 -
Obrázek 33 Kontrola periodicity řídicího signálu.....	- 35 -
Obrázek 34 Navržený kód v prostředí LabVIEW pomocí struktury Producent – Consumer	- 36 -
Obrázek 35 Vizualizace dílčích VI použitých pro komunikaci se zařízením.....	- 37 -
Obrázek 36 Vizualizace dílčích VI použitých pro generování a práci s pohyby přípravku	- 37 -
Obrázek 37 Experimentální seřízení přípravku do výchozích pozic.....	- 38 -
Obrázek 38 Graf aproximačních funkcí pohybů přípravku.....	- 38 -
Obrázek 39 Navržené grafické uživatelské rozhraní.....	- 39 -
Obrázek 40 Příklady možných automatických pohybů generovaných pomocí softwaru	- 40 -

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vstupní parametry pro výpočet výkonových parametrů servomotoru	- 27 -
Tabulka 2 Mechanické parametry zvoleného servomotoru [15]	- 29 -
Tabulka 3 Parametry použitého mikroprocesoru [16]	- 30 -
Tabulka 4 Sada navržených komunikačních příkazů	- 34 -

Úvod

V moderních automobilech se stále častěji objevují vysoce integrovaná čidla se sběrníkovým typem přenosu dat. Mezi nejčastěji používané přenosové sběrnice v automobilech pak patří sběrnice CAN, tato sběrnice je obousměrná a může na ni být připojeno více zařízení. V našem případě je senzor propojen s ECU pomocí poměrně nového standardu SENT, který slouží pouze k jednosměrné komunikaci čidla s jednotkou.

Snímač, který je v této práci využit, měří hladinu a přesnou koncentraci 32,5% vodného roztoku močoviny, známou pod obchodním názvem AdBlue a odpovídající normě ISO 22241-1. [4] Tento roztok se používá pro snižování emisí oxidů dusíku (NO_x) ve výfukových plynech dieselových motorů.

AdBlue se vstříkne do speciálně upraveného katalyzátoru automobilu, kde za tepla vyprodukovaného spalováním nafty dochází k selektivní katalytické redukci (SCR) oxidů dusíku (NO_x) na dusík N_2 a vodu H_2O . Jako vedlejší produkt vzniká oxid uhličitý CO_2 . Tato složitá metoda je důležitá pro snížení emisí dieselových automobilů tak, aby automobily splňovaly evropskou emisní normu EURO-6, platící pro nově vyráběné automobily od září roku 2014. [5]

Při vývoji a testování snímačů je nutné mít možnost ověřit si jejich funkčnost, čímž se bude zabírat tato práce. Návrh aplikace bude probíhat v programovacím prostředí LabVIEW, které umožní ovládat zařízení s koncovým mikroprocesorem. Vyvíjený testovací přípravek bude sloužit k dlouhodobým testům funkčnosti, kde se bude zaznamenávat obzvláště schopnost senzoru poskytnout relevantní data v předdefinovaných situacích.

LabVIEW vyvíjeno firmou National Instruments s.r.o., od roku 1986, slouží k rychlému a jednoduchému programování pomocí vizuálního rozhraní, kdy není k programování použit klasický textový kód, nýbrž je realizován spojováním programových bloků.

1 Continental Automotive Czech Republic s.r.o.

Diplomová práce byla zastřešena firmou Continental Automotive Czech Republic s.r.o., jež vytvořila zadání diplomové práce a s jejími zaměstnanci byly přesně definované požadavky pro tvorbu práce. Následné konzultace pak směřovaly efektivně k cíli.

Firma Continental s.r.o. byla založena roku 1871 v Hannoveru v Německu, kde vyráběla gumárenské produkty a pneumatiky pro jízdní kola. Časem se firma rozrostla až do dnešní podoby, kdy patří ke světovým špičkám ve výrobě pneumatik a vývoji automobilových technologií.

V oblasti automobilových technologií se firma zabývá bezpečností, pohonným ústrojím a komfortními systémy v osobní a nákladní dopravě. Další významnou částí je pak gumárenský průmysl, zajišťující výrobu a vývoj pneumatik a řemenů.

Koncern Continental má v současné době v České republice celkem sedm závodů, šest z nich patří ke skupině Continental Automotive. Firma v současné době zaměstnává v České republice přibližně 13 tisíc pracovníků. [6]



Obrázek 1 Sídlo vývojového centra firmy Continental s.r.o. Ostrava – Hrabová [6]

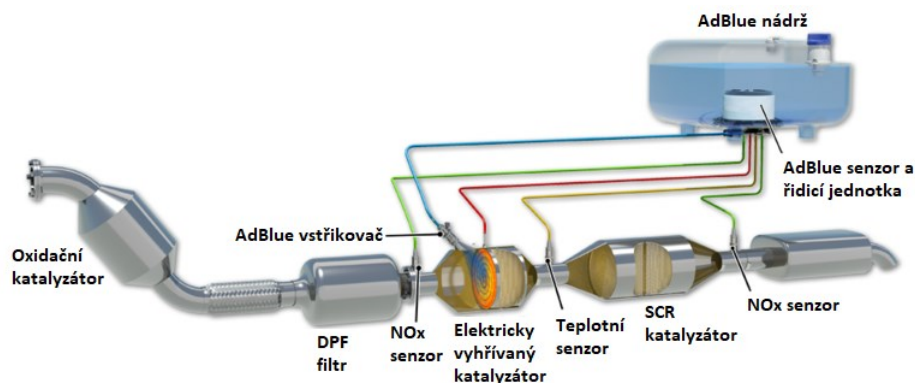
2 Rozbor problematiky

Ultrasonický senzor pro měření hladiny a koncentrace urea kapaliny je součástí sofistikovaného systému na řízení emisí moderních osobních a nákladních vozidel vybavených dieselovým motorem. Dieslový motor vyniká vysokou termodynamickou účinností, produkuje značné množství prachových částic a také oxidů dusíku NO_x. Oba tyto nežádoucí produkty jsou pro člověka nebezpečné. Emise prachových částic, které se usazují v dýchacích cestách jsou již dobře vyřešeny použitím filtrů pevných částic (DPF, FAP). Emise oxidů dusíku se s platnou emisní normou EURO6 a obzvláště aférou diesel gate staly ve sféře osobních automobilů velkým terčem zájmů. Emise oxidů dusíku a oxidu dusičitého (NO₂), který je pro lidský organismus velmi nebezpečný, neboť snadno proniká do plic a způsobuje rozdráždění sliznic. Pro snížení emisí těchto oxidů je do osobních automobilů integrován systém aktivní selektivní katalytické redukce. Vstřikováním urea kapaliny na aktivní vrstvu katalyzátoru dochází k chemické reakci jejíž výsledkem je produkce dusíku a vody, látek, které jsou součástí našeho ekosystému. [7]



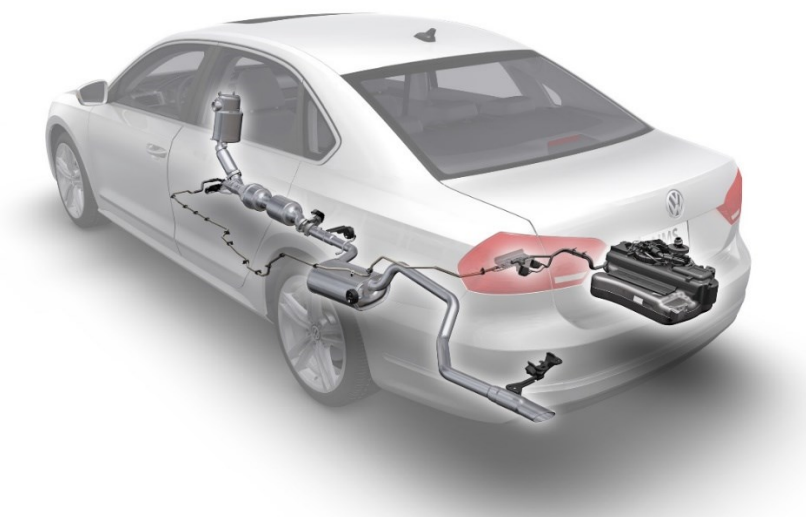
Účinnost této metody je reativně vysoká 80-90 %, tato účinnost je však regulována tak, aby osobní automobil splňoval danou emisní normu. Při zvyšující se účinnosti motorů a tím vyšší produkcí NO_x je obzvláště ve větších a těžších automobilech potřeba do katalyzátoru vstřikovat větší množství kapaliny. Výrobci automobilů se snaží nalézt optimální kompromis mezi plnění emisních limitů a spotřebou AdBlue kapaliny. Mezi výhody tohoto komplikovaného systému patří zvýšení teploty spalin ve spalovací komoře, protože oxidy NO_x jsou eliminovány přídatným zařízením. V praxi proto není nutné využívat v takové míře zpětnou recirkulaci výfukových spalin, výsledkem je pak zvýšení termodynamické účinnosti motoru z čehož plně vyplývá i snížení spotřeby, které se pohybuje okolo 7%. Další výhodou zvýšení teploty spalin je i následné rychlejší ohřátí potřebných katalyzátorů a filtrů pevných částic, které se výrobci snaží umístit v blízkosti turbodmychadla a motorového prostoru. [7]

Močovina se vyrábí z amoniaku a oxidu uhličitého v tlakovém reaktoru za vysokého tlaku a teploty. Vzniklá močovina se poté suší a granuluje. Jedná se tedy o poměrně složitý a energeticky náročný proces. Mezi výrobní závody patří velké chemičky, ze kterých se pak granulovaná močovina rozváží do distribučních center napříč kontinentem v rámci šetření nákladů na převoz kapaliny. V distribučních centrech se granulovaná močovina mísí s demineralizovanou vodou se ohřátou na teplotu 40–45 °C tak, aby vzniklý roztok obsahoval 32,5 % močoviny. Proces rozpouštění je poměrně rychlý, neboť močovina má vysokou rozpustnost ve vodě. Velmi zajímavá a možná trochu překvapivá je skutečnost, že močovinu nelze rozpouštět ve studené vodě. Při rozpouštění totiž dochází k poměrně prudkému ochlazení a roztok zamrzá. [8]



Obrázek 2 Emisní systém vznětového agregátu [7]

Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, cílem je vyvinout přípravek k testování jízdních režimů automobilu tak jako by byl senzor umístěn v reálném automobilu. Samotný senzor je v automobilu umístěn v nádrži na syntetickou močovinu. Nádobka je v automobilu umístěna v podběhu zadního kola nebo pod podlahou zavazadlového prostoru. Velikost nádrže se v závislosti na velikosti a hmotnosti automobilu pohybuje okolo 15 litrů.

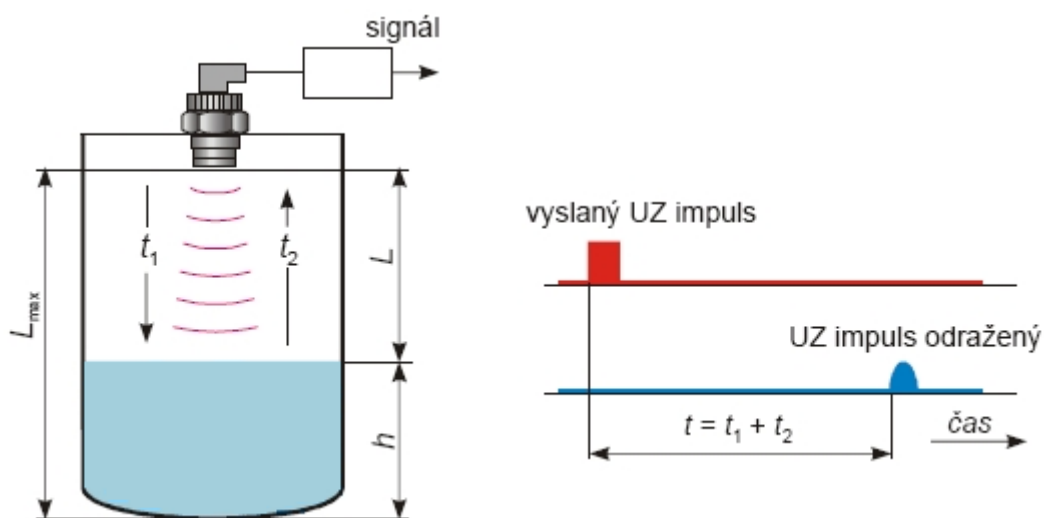


Obrázek 3 Umístění emisního systému v útrobach automobilu [7]

Při pohybu automobilu dochází vlivem působících sil při změně rychlosti a směru jízdy k naklánění hladiny kapaliny. Senzor měřící výšku hladiny kapaliny využívá principu odrazu zvukové vlny od hladiny kapaliny. Tento princip byl využit, protože se jedná o bezkontaktní měření, které eliminuje jakékoliv mechanické části v nádržce a snižuje výrobní náklady na senzor. Uložení senzoru na dně nádoby nebylo vybráno náhodou vzhledem k faktu, že nádrž není vždy rovnoměrných tvarů je tak umístění na dně nádržky nejjednodušší volbou, protože senzor je schopen měřit přesnější nižší stav kapaliny. Tomuto umístění vyhovuje i fakt, že roztok močoviny při teplotách nižších než $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ zamrzá a v bezprostřední blízkosti senzoru je umístěna uhlíková topná spirála, která umožňuje rychlejší roztopení kapaliny a následné měření.

2.1 Měření hladiny kapaliny ultrazvukovým signálem

Vysílač a přijímač ultrazvukových impulsů tvoří konstrukční celek, umístěný obvykle v horní části nádrže. Funkci celého zařízení řídí generátor pulsů. Na počátku měřicího cyklu je vyslán z vysílače UZ impuls, který se po odrazu od hladiny vrací zpět k přijímači. Doba t naměřená elektronickým obvodem závisí na délce dráhy ultrazvuku, a tím i na poloze hladiny. Poloha hladiny h se stanovuje odečtením poloviny naměřené dráhy impulsu od maximální vzdálenosti (vzdálenost ke dnu nádrže). Měřené časové intervaly se pohybují od desetin až po jednotky sekund. Na obrázku je nakresleno zjednodušené schéma ultrazvukového hladinoměru, který využívá měření doby šíření ultrazvukového impulsu (metoda Time of flight). [9]



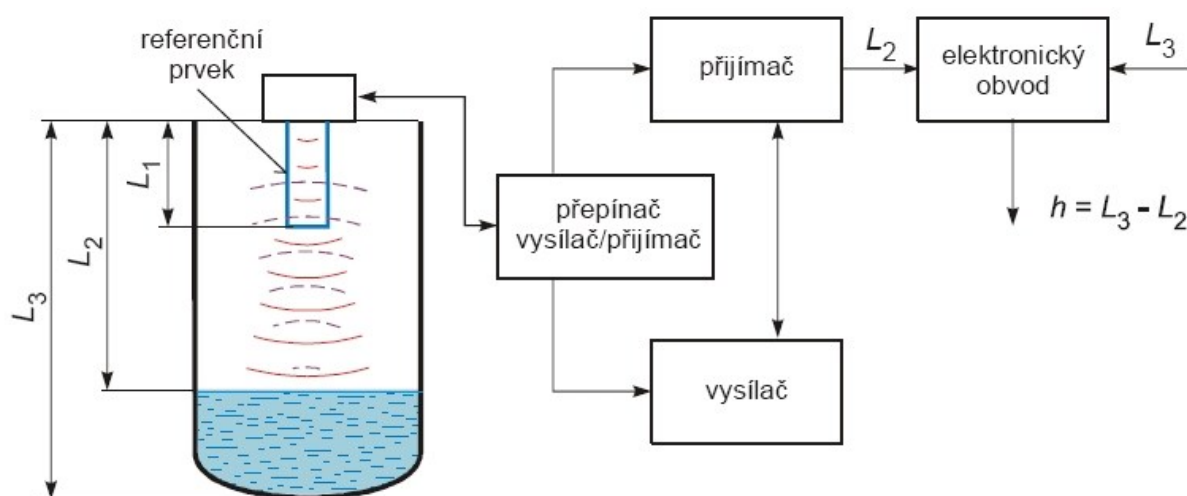
Obrázek 4 Princip měření hladiny pomocí ultrazvukového signálu [9]

$$h = L_{max} - c \frac{t}{2} \quad (1)$$

- c - rychlost ultrazvuku v prostředí
- t - naměřený čas,
- L - vzdálenost hladiny od snímače
- L_{max} - vzdálenost snímače od dna nádrže

Jako vysílače a přijímače ultrazvuku se nejčastěji používají piezoelektrické, méně často magnetostrikční měniče. Piezoelektrický měnič se využívá v první fázi jako vysílač ultrazvukových impulzů a v druhé fázi pak jako detektor přijímané odražené ultrazvukové vlny. Pracuje se s ultrazvukem s frekvencí od 20 do 60 kHz tudíž v pro člověka neslyšitelném pásmu.

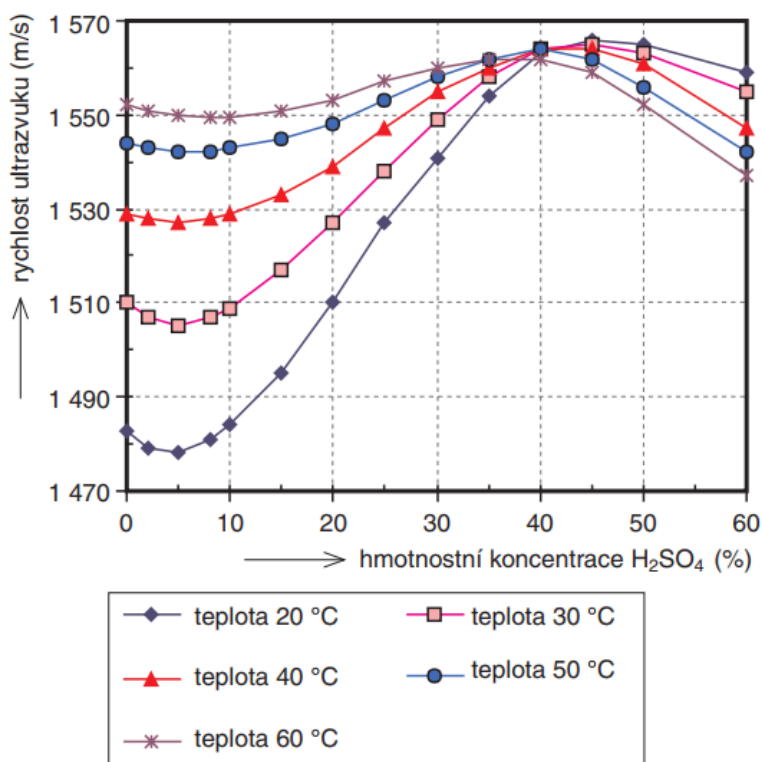
V rámci vyšší přesnosti měření v závislosti na měnících se vlastnostech prostředí je senzor opatřen referenčním prvky pro seřízení konstanty rychlosti ultrazvuku procházejícího kapalinou. Vyslaný ultrazvukový signál se částečně odrazí od referenčního prvku, který je umístěn v přesně definované vzdálenosti. Navracená část signálu je zaznamenána piezo elementem a z doby letu signálu jsme schopni upravit konstantu průchodu signálu prostředím. Prvek je vyobrazen na schématickém obvodu měření výšky hladiny



Obrázek 5 Vyhodnocovací elektronika pro zpracování ultrasonického signálu [9]

2.2 Měření koncentrace kapaliny ultrazvukovým signálem

Rychlost šíření ultrazvukových vln v kapalinách je závislá na složení kapaliny, její hustotě, viskozitě a teplotě. Závislost rychlosti zvuku v kapalných médiích nejde jednoznačně vyjádřit. Například pro solné roztoky jsou závislosti koncentrace a rychlosti zvuku lineární. Naopak u roztoků na bázi kyselin je tato charakteristika nelineární, což platí také v případě urea kapaliny. Příkladem budiž například závislost rychlosti zvuku na koncentraci kyseliny sírové na Obrázek 6 Závislost rychlosti zvuku na koncentraci kyseliny sírové [10].



Obrázek 6 Závislost rychlosti zvuku na koncentraci kyseliny sírové [10]

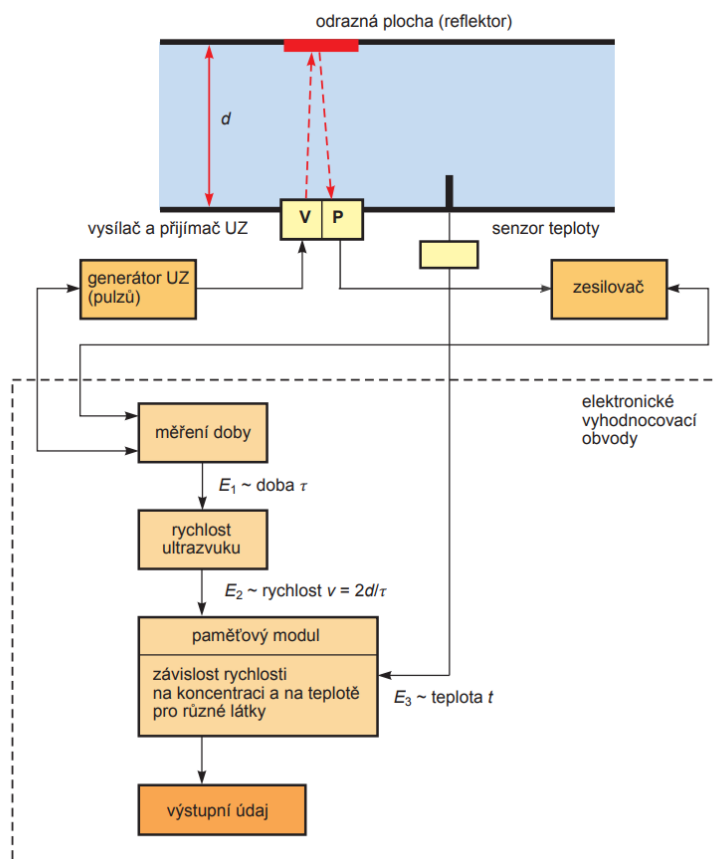
U měření koncentrace vycházíme ze základního vztahu pro rychlost zvuku

$$v = \frac{2 \cdot d}{t} \quad (2)$$

Kde v je rychlost zvuku v prostředí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], d vzdáleností referenční plochy [m] a t čas [s], za kterou se vyslaný zvukový signál vrátí zpět od referenční plochy. Známe-li rychlost v médiu

$$v = \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (3)$$

Dosažením do vztahu (3), kde C modul objemové pružnosti prostředí a ρ hustota kapaliny, můžeme vypočítat koncentraci kapaliny. [10] V našem případě však tohoto vztahu plně nevyužíváme, neboť v laboratorních podmínkách byla naměřena charakteristika závislosti teploty a koncentrace urea kapaliny na rychlosti zvuku. Výsledná koncentrace je tedy pouze vyčítána z tabulky dat.



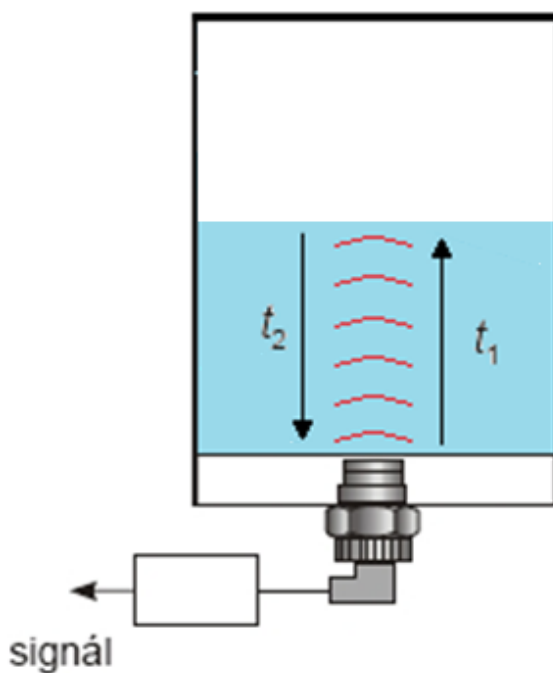
Obrázek 7 Vyhodnocovací obvod měření rychlosti zvuku v kapalině [10]

U měření koncentrace vyšleme ultrazvukový signál, který se odrazí od referenčních ploch s přesně definovanou vzdáleností a z doby, za kterou se zvukový signál vrátí zpět se vypočteme rychlost zvuku. S ohledem na teplotu měřené kapaliny je z paměťového modulu zjištěna koncentrace kapaliny. [9]

2.3 Problémy s měřením ultrazvuku v dopravním prostředku

Při pohybu automobilu, zatáčení a akceleraci či deceleraci, dochází vlivem změny kinetické energie a působení odstředivých sil k naklánění hladiny kapaliny v nádrži. Níže uvedené případy nastiňují podmínky, které mohou teoreticky nastat v nádrži s kapalinou.

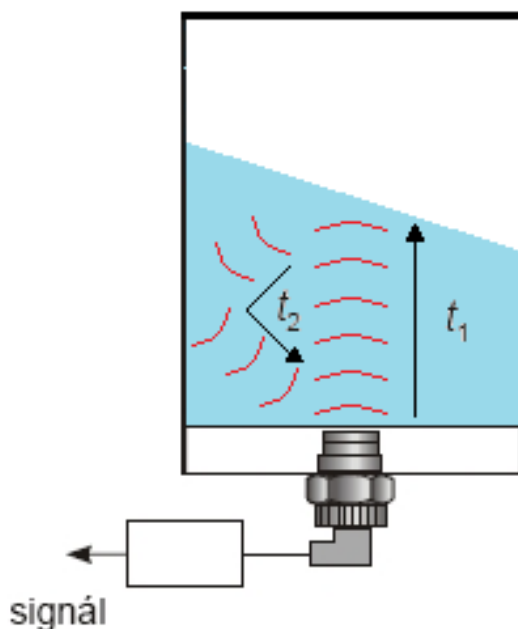
Hladina v klidném stavu je vodorovná tudíž vycházíme z předpokladu, že $t_1 = t_2$.



Obrázek 8 Ideální měření hladiny pomocí ultrazvukového signálu

V tomto ideální případě dochází k přímému odrazu hlavní vlny signálu od hladiny k senzoru, tudíž je čas letu i zpětného odrazu stejný a jsme tedy schopni přesně vypočítat výšku hladiny. Za předpokladu, že známe rychlost zvuku v kapalině, která pro vodu je 1460 m/s. Podmínkou tohoto měření je, že kapalina musí být bez tuhých nečistot, které by mohly ovlivňovat průchod signálu médiem. Jediným odporem v cestě ultrazvukového signálu je tedy pouze přechod mezi piezo elementem a dnem nádoby. V případě, že tento přechod není ze zcela homogenního materiálu, vzniklé překážky ve struktuře materiálu můžou působit jako klamné odrazy nebo v nejhorším případě zcela znemožnit průstup signálu touto vrstvou.

Další případ může nastat, není-li hladina ve vodorovném stavu vůči senzoru. Hlavní energie vyslaného ultrazvukového signálu není od hladiny odražena zpět ve stejném (podobném) úhlu jako signál příchozí. Tím může dojít ke stavu zakresleném na obrázku. Kdy se signál od hladiny odrazí pod úhlem a následně se přes odraz od stěny nádoby vrátí zpět ke snímači. Pro dobu letu signálu pak platí, že $t_1 < t_2$.



Obrázek 9 Chování ultrasonického signálu při inklinaci kapaliny v nádrži

Toto měření je nutné označit jako neplatné, neboť vyházíme z předpokladu, že doba letu vyslaného a příchozího signálu totožné. Výpočet doby, za kterou signál dosáhne hladiny počítáme z celkové doby letu dělenou dvěma. V tomto případě by prodloužení celkové doby průchodu signálu kapalinou způsobilo ve výpočtu chybu a tomu odpovídající zvýšení vypočtené výšky hladiny kapaliny. Tuto problematiku lze vyřešit použitím gyroskopu umístěném v senzoru. Pomocí gyroskopu možné určit maximální náklon senzoru pro který je senzor schopen poskytovat relevantní měření. Druhou možností je použití časových oken, které za použití předchozích hodnot měření umožní určit, zdali je příchozí ultrazvukový signál v očekávaném časovém rozsahu. Při překročení nastaveného intervalu již nelze počítat s tím, že signál nepochází z přímého odrazu od hladiny kapaliny.

Třetí možnost je taková, že vyslaný signál se zpět k senzoru nevrátí v potřebné intenzitě pro vyhodnocení signálu. Tento stav může nastat, když ultrazvukový signál nedokáže prostoupit k hladině a zpět. To může nastat důsledkem zpenění kapaliny nebo v popřípadě vícenásobného odrazu signálu v nádobě, kdy se hlavní energie signálu ztratila rozptýlením do prostoru nádoby. S tímto stavem se pojí i další problém, kdy kapalina začne mrznout. Vyslaný ultrazvukový signál v zamrzající kapalině narazí na krystalky ledu, které svým povrchem a strukturou roztříští signál do prostoru.

2.4 Simulace podmínek automobilu

Při provozu automobilu působí na senzor v nádržce mnoho faktorů, které negativně ovlivňují jeho činnost a výslednou přesnost. Mezi základní působení vlivů patří:

Teplota

Jedním z hlavních problémů provozování senzoru v urea kapalině je fakt, že kapalina při $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ zamrzá, což je potenciální problém, neboť zamrzlou kapalinu nelze měřit ani ji vstříkovat do SCR katalyzátoru. Tuto problematiku je možné řešit elektrickým výhřevem kapaliny, popř. vedením odpadního tepla motoru skrze nádobu s urea kapalinou. Dalším problémem se zamrzáním kapaliny je roztažnost látky v pevném skupenství, kdy samotná nádoba a její dílčí části musí být navrženy tak, aby při jejich roztažení nedošlo k destruktivnímu poškození. V opačném spektru teplotních podmínek již teoreticky žádné problémy nehrozí.

Přetížení

Při pohybu automobilu dochází vlivem přetížení (akcelerace, decelerace, boční přetížení) k pohybu kapaliny v nádržce. Jak již bylo zmíněno v sekci 2.3, při působení bočních sil dochází k inklinaci kapaliny, která způsobuje problém v měření výšky hladiny kapaliny v nádrži. Samotné čerpání kapaliny je vyřešeno vhodným uzpůsobením nádoby tak, aby v dolní části i při velmi nízké hladině kapaliny nedocházelo k práci čerpadla bez kapaliny. Kapalina slouží pro samotné čerpadlo jako odpor, aby nedocházelo k vysokootáčkovému poškození čerpadla naprázdno. Kapalina slouží dále jako chladicí médium pro elektromotor čerpadla.

Vibrace

V automobilu vzniká mnoho vibrací způsobených jak pohybem automobilu po nerovné vozovce, tak i samotným provozem vznětového motoru. Vibrace však nečiní při měření značný problém, protože zkreslení rozčtěnou hladinou je tak minimální, že jej můžeme zanedbat.

Rázy

Při pohybu automobilu po poškozené silnici nebo v terénu, dochází vlivem propadu kol do nerovností ke šplouchání kapaliny, při kterém je prakticky nemožné měřit hladinu kapaliny. Následkem tohoto jevu může být i zpěnění kapaliny, kdy se na hladině mohou objevovat bubliny. Pokud narazí ultrasonický signál narazí do bubliny, nedojde k plnému odrazu a odraženou energii nedokáže piezo element zaznamenat.

3 Návrh hardwarové části přípravku

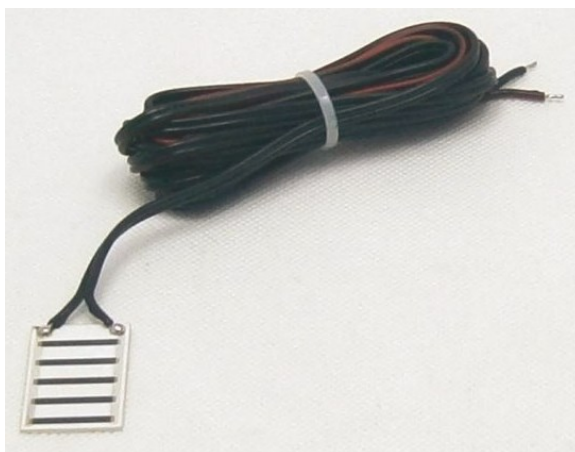
Na začátku tvorby diplomové práce byly s vedoucím práce probrány základní požadavky na vytvoření přípravku, tak aby korespondovaly s realizovatelností přípravků a s rozsahem odpovídající diplomové práci.

Požadavky na tvorbu zařízení:

- Stabilní a pevná konstrukce
- Zařízení musí být mobilní a skladné
- Simulace inklinace nádoby do 25°
- Manipulace přípravku s testovací nádobkou do hmotnosti 2 kg
- Použití přípravku pro více typů senzorů
- Napájecí napětí 9–30 V
- Možnost napájení z externího adaptéru a laboratorního zdroje
- Implementace automatického režimu pro demonstrační účely
- Komunikace s PC
- Příprava pro integraci k testování v softwaru TestStand

3.1 Simulace teploty

Pro simulaci teploty bylo usouzeno, že dostačujícím aspektem bude simulování teploty pouze pro teploty vyšší či rovny pokojové teplotě. K této simulaci poslouží topná nízko výkonová spirála napájena 12 V a výkonem 10 W. Jako topnou spirálu jsme vybrali keramickou destičku s polovodičovou vrstvou oxidu hliníku. Výhodou tohoto zařízení je bezesporu jeho cena a nízká hmotnost. Další výhodou je možnost montáže na stěnu testovací nádoby s kapalinou, a to z důvodu, že samotná nádoba je vyrobena z plastu a nesnesla by umístění zařízení o vysoké teplotě umístěné do stěny nádoby. Kompaktní rozměry a ponorné umístění tělesa do nádoby poskytují jednoduchou použitelnost řešení pro jakýkoliv typ testovací nádoby



Obrázek 10 Topené těleso pro výhřev kapaliny v nádobce

3.2 Simulace přetížení, náklonu

3.2.1 XY polohování

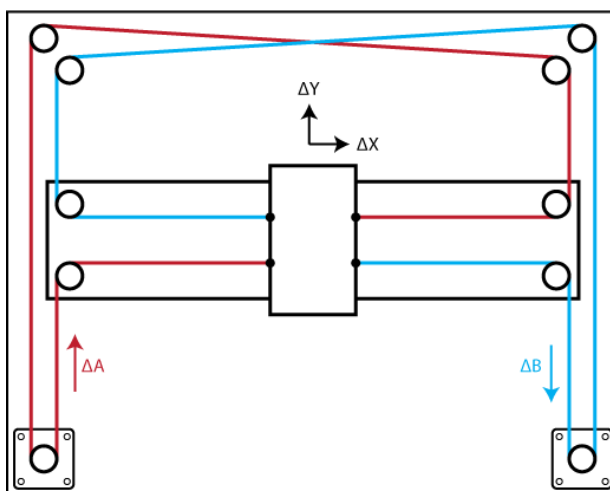
Prvním navrhovaným řešením bylo generovat samotné přetížení. Myšlenky tedy padly na zařízení pohybující se samotnou nádobkou v ose X a Y, k čemu lze využít i stávající prostředky volně prodejně na trhu. Nádobka bude umístěna na jezdcí uprostřed zařízení. Uvedení do pohybu v patřičné ose vygeneruje přetížení zrychlením a následné bržděním pohybu nádoby. Toto generování náklonu kapaliny je sice konstrukčně velice jednoduché, obzvláště při použití již stávající koncepcí, avšak samotná reprodukovatelnost měření je daná i samotnou kinematikou přípravku. Negativním aspektem je, že pokud by došlo k záměně testovací nádoby s definovaným množstvím použité kapaliny, musel by k tomu být uzpůsoben i výpočet generující automatický pohyb.

Výhody:

- + Přímá měřitelnost zrychlení
- + Již existující konstrukce dostupná k zakoupení

Nevýhody:

- Velikost zařízení
- Generování náklonu hladiny kapaliny pouze do mezí daných rychlostí
- Generování náklonu hladiny kapaliny pouze pro velice krátký časový okamžik
- Vyšší nároky na zatížení zařízení,
- Nemožnost simulovat pohyb v ose Z



Obrázek 11 XY polohování pomocí dvou lineárních posuvů

3.2.2 3DOF polohování

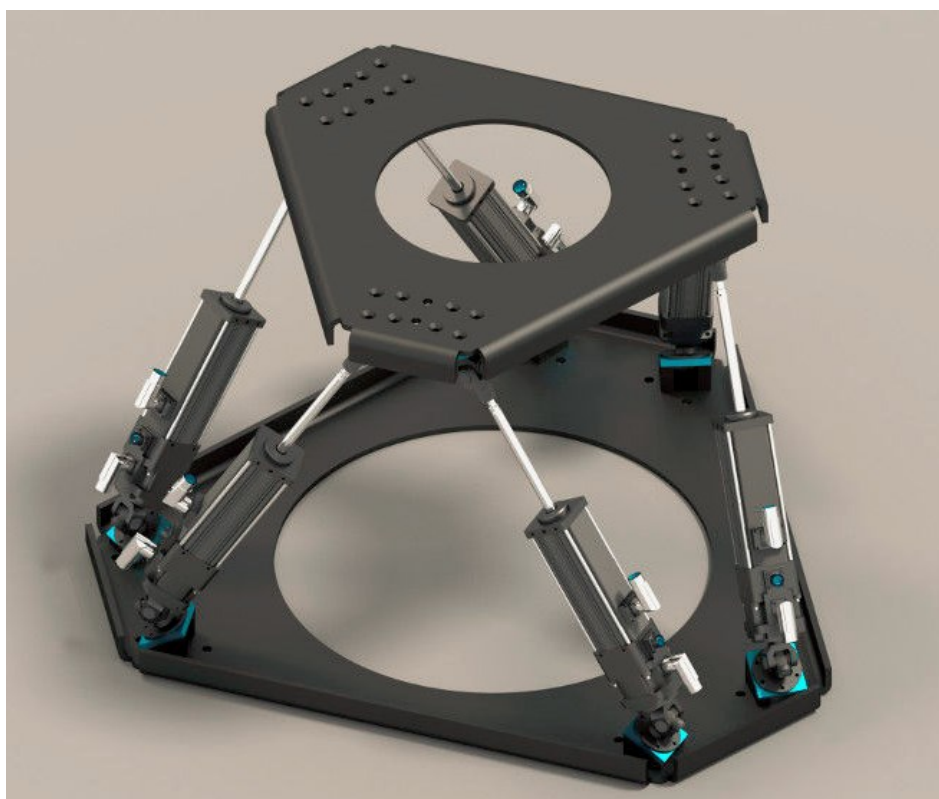
Dalším návrhem bylo generování samotného náklonu hladiny pomocí tří pístů, popřípadě lineárních pohonů. Akční členy jsou upevněny k podstavě ve své pohyblivé části a drží v prostoru nosnou konstrukci pro manipulační desku.

Výhody:

- + Relativně kompaktní rozměry
- + Velice přesné polohování ve všech osách

Nevýhody:

- Vysoká cena stavby zařízení
- Obtížná regulace náklonu
- Vyšší nároky na zatížení zařízení



Obrázek 12 Zařízení pro 3DOF polohování [11]

3.2.3 Polohování na kulovém čepu

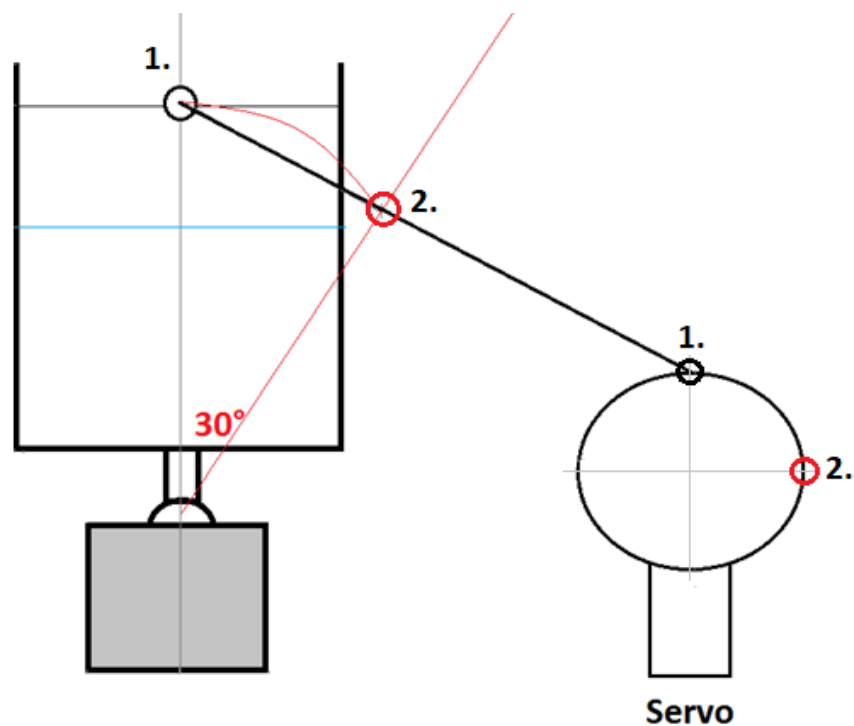
Jako poslední řešení jsme zvolili zjednodušení koncepce 3DOF polohovacího zařízení. Polohovaná plocha nebude umístěna a držena v prostoru pouze akčními členy, nýbrž bude umístěna na kulovém čepu. Ovládání náklonu pak bude realizováno pomocí lineárních pohonů nebo v našem případě pomocí přepákování servomotoru.

Výhody:

- + Akceptovatelné rozměry
- + Levné a jednoduché ovládání servomotory
- + Většina váhy nádoby umístěna na kulovém čepu
- + Očekávaná vysoká životnost při nízkých nákladech

Nevýhody:

- Nepřímá měřitelnost zrychlení
- Obtížnější výměna nádoby (umístění čepů)
- Nemožnost simulovat pohyb v ose Z



Obrázek 13 Princip náklonu nádoby na kulovém čepu pomocí páky servomotoru

3.2.1 Zvolené řešení

Samotná simulace pohybů pro Z osu by pak byla značně komplikovanou. Co se konstrukce přípravku týče, je nutné vygenerovat velice rychlý pohyb, aby došlo k vzednutí kapaliny. Jediným z možných řešení schopných simulovat pohyb ve všech třech osách je zařízení popsané v sekci 3.2.2 3 DOF. Pro návrh tohoto přípravku je však nutné počítat s velkým silovým zatížením, tudíž i použití rychlých a zároveň silných akčních členů. Tento typ konstrukce odporuje požadavku na skladnou a mobilní konstrukci, a proto byla tato možnost zamítnuta. Po vzájemné domluvě s konzultujícím bylo rozhodnuto, že pro samotné testování bude dostačující pouze simulace náklonu kapaliny. Pohyb nádoby s kapalinou v ose Z je spíše výjimečný a dochází k němu pouze v krajních případech. Pokud však tento jev nastane, je z fyzikálního hlediska prakticky skoro nemožné naměřit relevantní data. Proto se touto problematikou již nebude dále zabírat.

Pro výslednou konstrukci bylo rozhodnuto použít poslední ze tří řešení s využitím středového kulového čepu. Řešení nabízí rozumný kompromis mezi velikostí zařízení a nabízenými výhodami. Pro pohon přípravku bylo navrženo použití modelářských servomotorů, sloužících k obsluze lopatek velkých modelů letadel a lodí. Pro tuto aplikaci je důležité z hlediska výkonu a výdrže použít servomotory z dražších sérií, osazené kovovými převody z důvodů vyšších nároků na manipulační sílu. Kvalitnější servomotory jsou osazeny v kovového obalu kvůli vyššímu výkonovému a tepelnému zatížení.

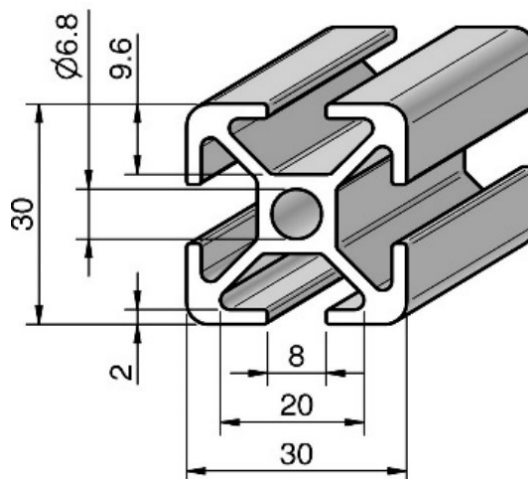
3.3 Navržená konstrukce

Pro návrh konstrukce jsem se byl využit stavebnicový systém hliníkových profilů Ostravské společnosti Alváris s.r.o. Konstrukce musela odpovídat požadavkům na vysokou stabilitu celé přípravku při simulaci dynamických pohybů s kapalinou. Současně musí být zaručena tuhost pro uchycení akčních členů, tak aby nedocházelo k jejich pohybu či oscilacím. Celá konstrukce musí dále nést řídicí a napájecí elektroniku. Zařízení musí být přenosné a potřebně mechanicky odolné tak, aby bez újmy vydrželo manipulaci a přesuny.



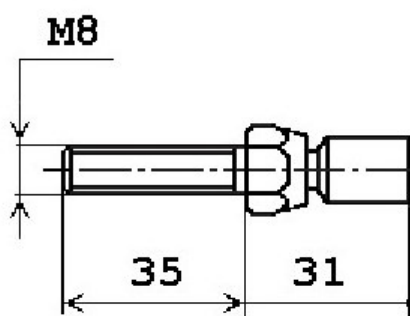
Obrázek 14 3D vizualizace navržené konstrukce z hliníkových profilů

Hliníková konstrukce nabízí dobrý poměr mezi robustností konstrukce a nízkou hmotností. Stavebnicový systém nabízí široké možnosti uchycení jednotlivých částí elektroniky a akčních členů. Pro vytvoření spojů konstrukce z profilů jsme se rozhodli použít klasické pravoúhlé „L“ úchyty, jež jsou připevněny k profilům pomocí drážkové matice šroubem M8. Konstrukce je uchycena na čtyřech gumových nohách o velikosti 80 mm, které zaručují stabilitu a přilnavost k podložce. Na bocích konstrukce jsou připevněny hliníkové držáky o velikosti 50 mm pro uchycení manipulačních servomotorů.



Obrázek 15 Rozměry použitých hliníkových profilů [12]

Uprostřed celého zařízení je umístěn středový profil k upevnění nádoby pomocí přímého kulového čepu, sloužící k pohyblivému spojení simulační nádoby. Hlavní výhodou této konstrukce je, že čep na sobě nese většinu váhy simulační nádoby, a proto je zatížení samotných servomotorů omezeno pouze na sílu působící při náklonu a pohybu kapaliny. Výchylka čepu je přibližně 30° v obou osách vůči neutrální poloze, v této aplikaci však bude vychylován pouze do úhlu 25° , aby nedocházelo k pohybu do limitních mezí. Čep se v krajní poloze začíná opírat o hranu lůžka, čímž dochází k opotřebování čepu i lůžka samotného. Při této poloze dochází k vertikálnímu pohybu v lůžku čepu a tím se do soustavy vnáší nepřesnost.



Obrázek 16 Použitý kulový čep pro náklon testovací nádoby [13]

3.3.1 Testovací nádobka se senzorem

K vytvoření univerzálního přípravku pro uchycení všech typů senzorů, byla pro simulaci inklinace kapalina vytvořena nádobka z PVC trubek. Na dně nádoby byl vyřezán otvor, do kterého je za pomoci tavné pistole připevněn senzor pro měření hladiny a koncentrace urea kapaliny. Použití lepidla z tavné pistole zaručuje vodotěsné spojení. Spodní část se senzorem je s tělem nádoby spojena pomocí pevného gumového těsnění. Ke spodní části nádoby jsou připevněny tři dřevěné nohy, které umožňují přístup ke konektoru senzoru. Samotné nohy pro testovací účely nejsou potřebné, neboť senzor lze umístit do držáku tak, že spodní hrana nádoby se upevní do výše šroubů a tím je nádobka pevně uchycena nad držákem. Vzniklý dvoucentimetrový prostor slouží pro umístění a manipulaci s komunikačním konektorem. Pro každý typ senzoru je pak nutné vytvořit vlastní nádobku, což vzhledem k pořizovací ceně materiálu činí velice zanedbatelnou položku. Nádobka může být použita ve čtyřech vyráběných průměrech 110, 125, 140 a 160 mm. Tyto průměry nádobek lze upevnit do držáku pro testovací nádobek. S použitím vlastní nádoby pro každý typ senzoru je zaručena maximální kompatibilita pro budoucí i minulé senzory.

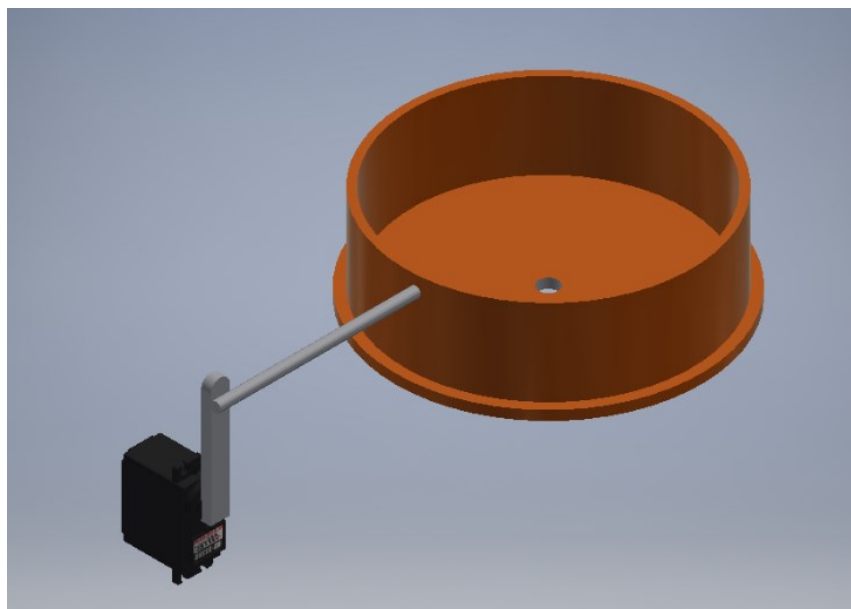


Obrázek 17 Navržená testovací nádobka s integrovaným senzorem

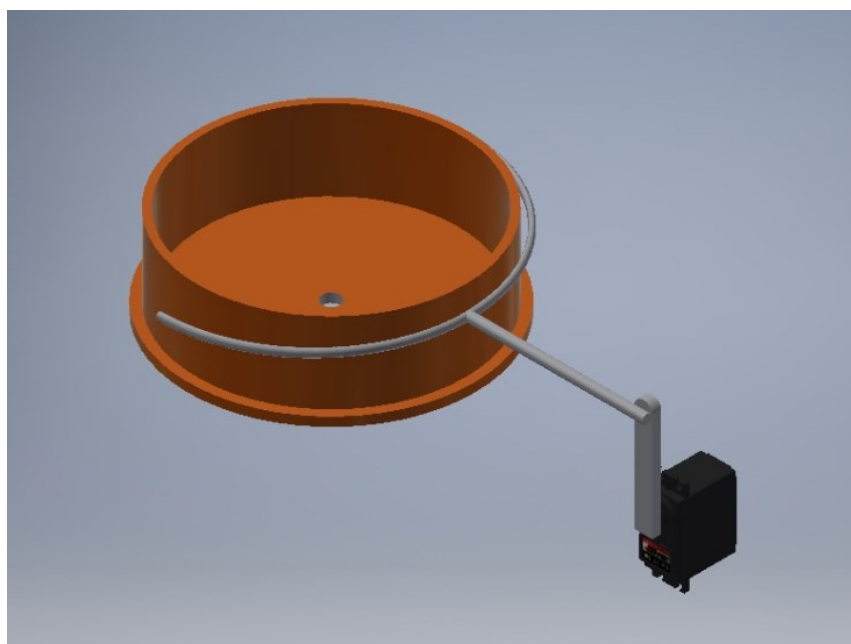
3.3.2 Pákový převod

Při návrhu pákového převodu přípravku a servomotoru bylo rozhodnuto použít RC čepy řízení velikosti M3. Pro přenos síly byla použita nerezová závitová tyč typu M3. Převod síly je uskutečněn dvěma druhy uchycení. První variantou je rozdělení závitové tyče a uchycení přípravku z obou stran v ose pohybu vizualizované na Obrázek 18 Pákový převod pomocí dvou pohyblivých bodů pro polohování nádoby v ose X. Toto řešení je ideální, protože pákový převod je téměř lineární a zamezuje

protočení přípravku okolo vlastní osy. Druhý způsob je použit pro pohyb v druhé ose, kdy převod síly je řešen pomocí jednoho čepu umístěného na hraně přípravku. Tento pohyb není již lineární vzhledem k dráze, kterou opisuje páka servomotoru vůči pohybu prováděného přípravkem. Avšak toto řešení je jednodušší a pevnější než v prvním případě. Způsobená nelinearita pohybu je vykompenzována pomocí aproximace polynomicou rovnicí implementovanou v řídicím softwaru.



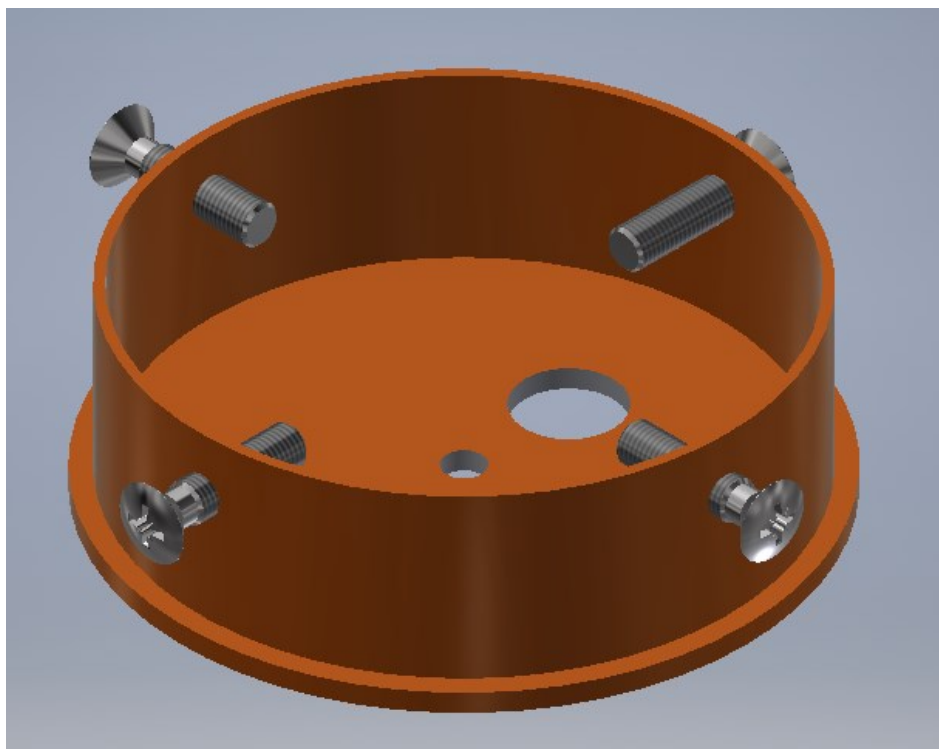
Obrázek 18 Pákový převod pomocí dvou pohyblivých bodů pro polohování nádoby v ose X



Obrázek 19 Pákový převod pomocí tří pohyblivých bodů pro polohování nádoby v ose Y

3.3.3 Uchycení testovací nádoby

Pro uchycení testovací nádoby byl vymyšlen mechanismus čtyřbodového uchycení pomocí šroubů usazených do kraje testovacího přípravku pomocí závitů M6. Závity jsou vytvořeny přímo v plastové konstrukci manipulačního segmentu. Toto řešení je poměrně jednoduché a umožňuje nádobku uchytit dostatečně pevně, aby při naplnění nádoby větším množstvím kapaliny nedošlo k jejímu uvolnění. Vzhledem k délce šroubů 40 mm, lze do přípravku usadit nádoby od průměru 110 až 180 mm. Při uchycování nádoby je doporučeno nádobku umístit tak, aby byla vycentrována do středu přípravku. Nedochází poté ke zbytečnému zatěžování servomotorů jak v klidové (vodorovné) poloze tak ani při maximálních výchylkách nádoby. Na dně uchycovacího přípravku je vyfrézován dostatečně velký otvor pro provlečení konektoru a kabeláže senzoru. Kabeláž lze pak následně uchytit pomocí suchého zipu k hliníkovému profilu konstrukce, aby nedocházelo k zbytečnému opotřebení vodičů třením o kraj přípravku při simulacích pohybů. Umístění pohyblivých čepů je řešeno pod těmito šrouby. Tím je zaručen lepší přístup k hlavě šroub.



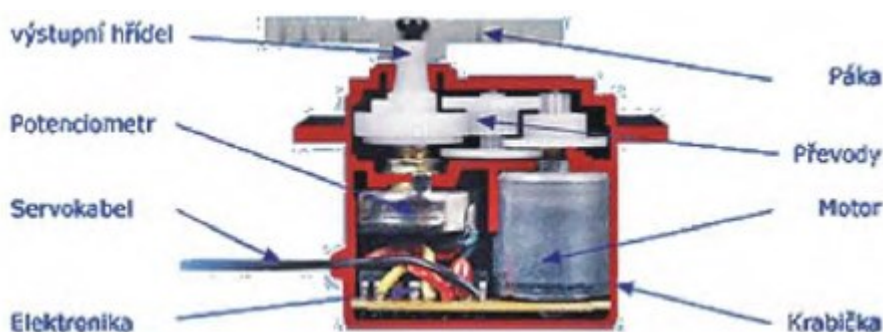
Obrázek 20 Vizualizace 3D modelu pro uchycení testovací nádoby

3.4 Řízení, akční členy

Pro naklánění nádoby s kapalinou bylo rozhodnuto využít RC servomotory, kde přenos síly bude **realizován** pomocí tří kulových čepů a spojovací závitové tyče. Toto řešení umožňuje značnou flexibilitu celého spojení, jež umožní pohyb nádoby v obou osách X a Y.

3.4.1 Servomotor

Servomotor je elektromechanické zařízení, které převádí řídicí impulzy z přijímače na mechanický pohyb výstupní páky. Veškeré součástky, ze kterých je servomotor vyroben jsou uloženy v plastové nebo kovové krabici, obsahující elektromotor, převodovku, potenciometr a řídicí elektroniku. RC servomotory jsou vyráběny v několika základních provedeních, lišící se velikostí a působícím silovým momentem na mini, standart a jumbo. [14]



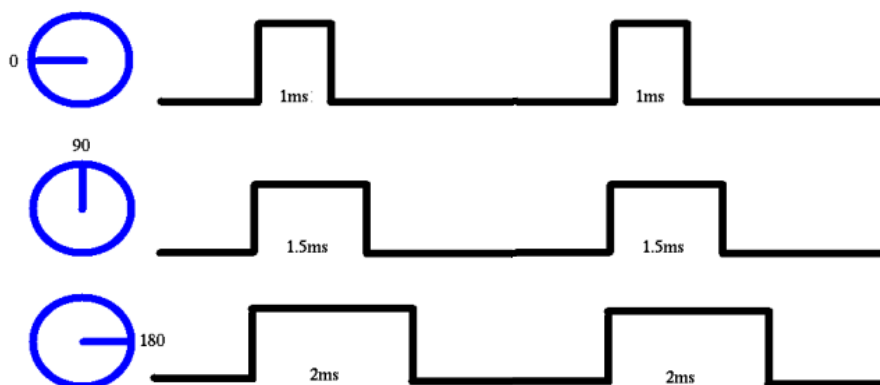
Obrázek 21 Řez servomotorem s popisem dílčích částí [14]

Servomotor se připojuje pomocí tří vodičového kabelu, kde dvě žíly slouží pro napájení (černá a červená) a jedna pro řídicí impulzy servomotoru (oranžová). Nejčastěji používaným konektorem servomotoru je pak typ 5810, použitý i v našem případě. Uvnitř servomotoru je servokabel, zapájen do desky řídicí elektroniky. Řídicí elektronika zpracovává řídicí signál z přijímače a podle jeho změn dává impulzy k roztočení elektromotoru, který pohání přes převodovku ovládací páku.

Převodovka se skládá z několika ozubených kol. Její celkový převodový poměr určuje jak rychle a s jakou silou se bude otáčet výstupní hřídel posledního kola převodovky, na kterém je nasazena ovládací páka, která prostřednictvím táhla ovládá případné zařízení. Celkové provedení převodovky se liší dle nutnosti výstupních parametrů. Mezi používané materiály převodů patří plast nebo kovové provedení používané pro dražší a odolnější servomotory. Poslední ozubené kolo převodovky slouží k přenosu informace o poloze pro zpětnovazební potenciometr. Ten porovnává, zda délka signálu z přijímače odpovídá natočení ovládací páky. V moderních digitálních servomotech bývá místo potenciometru použit přesnější inkrementální čítač, který nabízí přesnější nastavení dané polohy. [14]

3.4.2 Řízení servomotoru

K ovládání servomotoru slouží pulz o specifické šířce, označován z anglické literatury jako signál PWM (pulzně šířková modulace). Tento pulz musí být generován periodicky, a to minimálně frekvencí 50 Hz. Pro všechny servomotory platí, že středová poloha je dána šířkou pulsu 1500us. Co se týče krajních poloh je situace trochu odlišná, obecně však pulzy o šířce 1000us a 2000us označují krajní pozice. V našem případě používáme rozšířený pulz v intervalu od 850us do 2150us, jež zvětšuje rozlišení kroku servomotoru.



Obrázek 22 Princip řízení servomotoru pomocí střídý PWM signálu

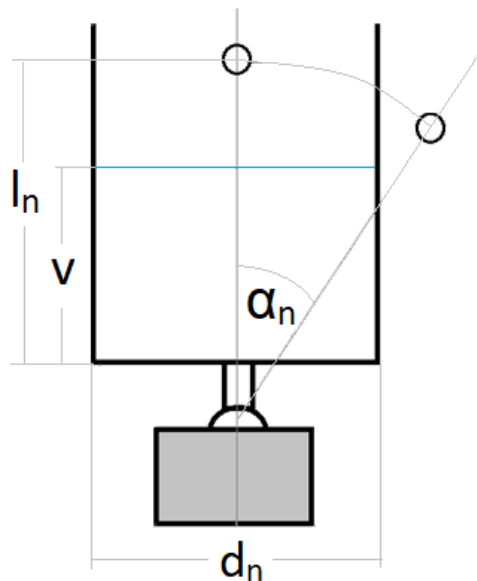
3.4.3 Výpočty servomotoru

Pro výpočty byly navrženy optimální pracovní hodnoty, pro které byly počítány potřebné výkonové nároky na servomotor. Potřebné vstupní parametry jsou zakresleny na Obrázek 23 Popis jednotlivých parametrů na teoretickém schématu a uvedeny v Tabulka 1 Vstupní parametry pro výpočet výkonových parametrů servomotoru

Tabulka 1 Vstupní parametry pro výpočet výkonových parametrů servomotoru

α_n	Úhel náklonu nádoby	25	[°]		
l_n	Umístění čepu od osy	70	[mm]	0,07	[m]
d_n	Průměr nádoby	120	[mm]	0,12	[m]
v	Výška hladiny	80	[mm]	0,08	[m]
m_n	Hmotnost nádoby	400	[g]	0,4	[kg]

Z konstrukčních důvodů bylo rozhodnuto, že s nádobkou bude nakláněno pouze do úhlu 25°, což vyhovuje mechanické konstrukci s použitím středového kulového čepu a současně náklon není tak velký, aby docházelo k vylévání kapaliny mimo nádobku.



Obrázek 23 Popis jednotlivých parametrů na teoretickém schématu

Výpočet vychýlení čepu vůči ose nádoby

$$x = \cos(90^\circ - \alpha_n) \cdot l_n = \cos(65^\circ) \cdot 70 = 29,58 \text{ mm} \quad (4)$$

Výška hladiny vody pro měření byla po prostudování specifikace senzoru zvolena na hodnotu 80 mm. Tato hodnota odpovídá pracovním podmínkám v nádrži automobilu. Menší množství kapaliny nebude zbytečně zatěžovat servomotory zbytečnou zátěží.

$$F_g = m \cdot G = (\pi \cdot r^2 \cdot \rho_v + m_n) \cdot G = (\pi \cdot 0,085^2 + 0,4) \cdot 998 \cdot 9,81 = 12,79 \text{ N} \quad (5)$$

Vypočetli jsme si sílu, kterou nádobka naplněná vodou působí svisle na čep, nyní je třeba vypočítat jakou silou bude potřeba působit na nádobku k tomu, abychom ji dostali zpátky z náklonu do vodorovného stavu.

$$F = \sin(90^\circ - \alpha) \cdot F_g = \sin(90^\circ - 25^\circ) \cdot 12,79 = 11,59 \text{ N} \quad (6)$$

Vycházíme ze vztahu pro nakloněnou rovinu, kde zanedbáváme odpory vzniklé třením kulových čepu. Výsledná síla pak musí být větší než 11,59N. Nyní jsme schopni pomocí předchozího vztahu vychýlení čepu od svislé osy vypočítat jakou silou bude muset servomotor působit na nádobku, pro potřebný moment je počítáno s převodní pákou servomotoru o délce 70 mm.

$$M = R \cdot F = x \cdot F = 0,07 \cdot 11,59 = 0,811 \text{ N.m} \quad (7)$$

Vypočtenou hodnotu potřebnou je třeba ještě přepočítat, aby byla porovnatelná s katalogovými hodnotami pro výběr samotného servomotoru, neboť hodnoty jsou ve specifikacích RC servomotorů uváděny v jednotkách kg.cm.

$$M = 0,811 \text{ N.m} \cong 8,11 \text{ kg.cm}$$

3.4.4 Volba servomotoru

Pro tuto aplikaci bylo rozhodnuto použít servomotory SPMSH6260 Spektrum. Servomotory jsou svým výkonem a provedením určeny pro řízení velkých modelů letadel a vrtulníků. Nabízí tedy vhodný kompromis mezi cenou a výkonem. Mezi jejich přednosti patří celokovový obal, jež velice dobře dokáže odvádět teplo servopohonu a nabízí značnou mechanickou odolnost celkového provedení. V pouzdře jsou umístěny dvě kuličková ložiska a převodovka osazena kovovými koly. Výkon tohoto servomotoru při použití vyššího napájecího napětí dosahuje 27,5 kg.cm, což trojnásobně převyšuje naše požadavky. Tato výkonová rezerva bude schopna pokrýt mechanické tření čepů a případné dynamické pohyby kapaliny.

Tabulka 2 Mechanické parametry zvoleného servomotoru [15]

Řízení	Digitální
Napájecí napětí	4,8 – 7,4 V
Rozměry	Standard 40,9x20,9x31,8 mm
Hmotnost	65,2 g
Moment	19,5 kg.cm @ 6 V, 27,5 kg.cm @ 7,4 V
Rychlost	0,2 s/60°@6 V; 0,14 s/60°@7,4 V
Převody	Kovové
Ložiska	2x kuličková
Typ motoru	DC
Konektor	Univerzální 5810

Servomotor je upevněn ke konstrukci pomocí čtyř šroubů M4 x 60 mm, uchycené přímo v závitu v hliníkovém profilu. Upevnění nevyžaduje použití matic pro dotažení. Šrouby jsou vloženy do držáků na obalu servomotoru s gumovými podložkami dodávanými standardně k pohonu. Podložky slouží k utlumení největších rázů působící na servomotor a také pro jistou toleranci při upevnění k hliníkovému profilu.



Obrázek 24 Servomotor SPMSH6200 Spektrum [15]

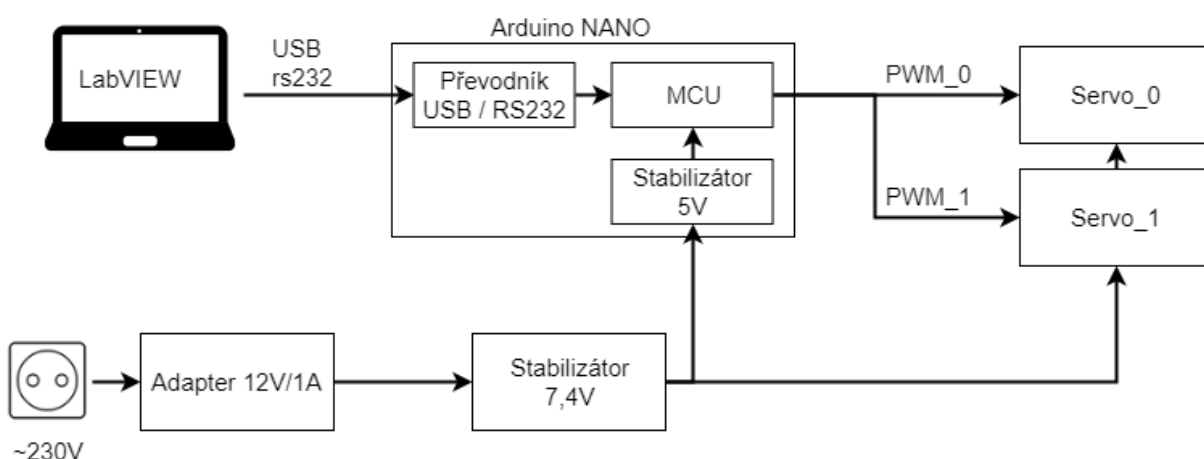
3.5 Elektronika

Základem elektronického zapojení jsou servomotory řízené pomocí mikroprocesoru ATmega328 osazeném ve vývojovém kitu Arduino Nano. Výkon tohoto 8 bitového RISC (redukována instrukční sada) procesoru je nadmíru dostačující pro realizaci komunikace a řízení servomotorů.

Tabulka 3 Parametry použitého mikroprocesoru [16]

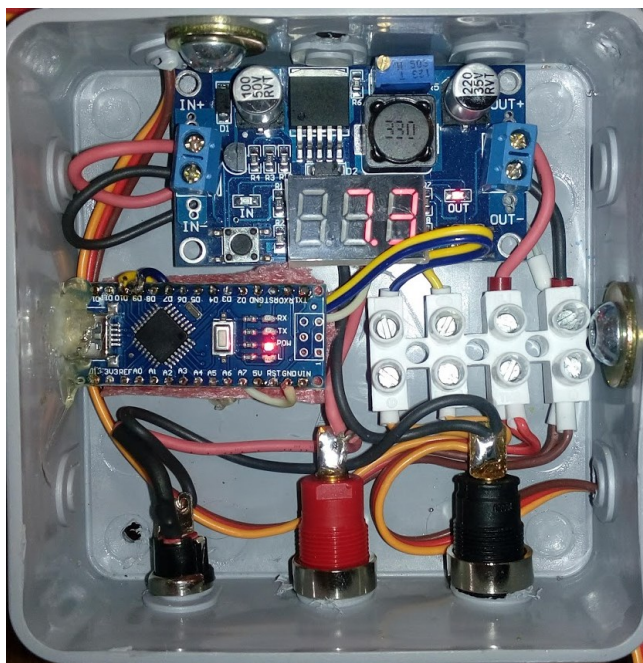
Mikroprocesor	ATmega328
Architektura	AVR
Pracovní napětí	5 V
Flash paměť	32 KB, 2 KB bootloader
SRAM paměť	2 KB
Časování	16 MHz
Analog vstupů	8
EEPROM paměť	1 KB
Digitální vstupy/výstupy	22 (6 PWM výstupů)
Napájecí napětí	7-12 V
Velikost desky	18 x 45 mm

Napájení celého obvodu je řešeno 12 V adaptérem s maximálním proudovým výstupem 1 A. Adaptér slouží k napájení samotného senzoru a také k napájení stabilizátoru. Stabilizátorem snižené napětí na 7,4V je nejvyšší dovolené napětí, při kterém servomotory poskytují nevyšší výkon. Tímto napětím je napájen i kit s mikroprocesorem, který je vybaven vlastním stabilizátorem pro pěti voltový standart TTL. Mikroprocesor může být napájen pomocí USB konektoru, avšak při využití přípravku k demonstračním účelům nemusí být vždy připojen k počítači, tudíž bylo napájení vyřešeno externě.



Obrázek 25 Schéma znázorňující propojení HW částí systému

Veškerá elektronika byla umístěna do elektromontážní krabice. Elektronika není přístupná pouhým nahodilým dotykem a zároveň je chráněna proti možnosti poškození kapalinou využívanou při simulaci pohybů. Krabice je osazena komunikačním konektorem micro USB. Napájení je řešeno konektorem 5,5x 2,5mm, který je elektricky propojen s dvěma napájecími zdírkami pro standartní banánky. Toto napájení slouží i k napájení samotného senzoru, popřípadě je lze využít v laboratorních podmínkách k napájení z laboratorního zdroje.



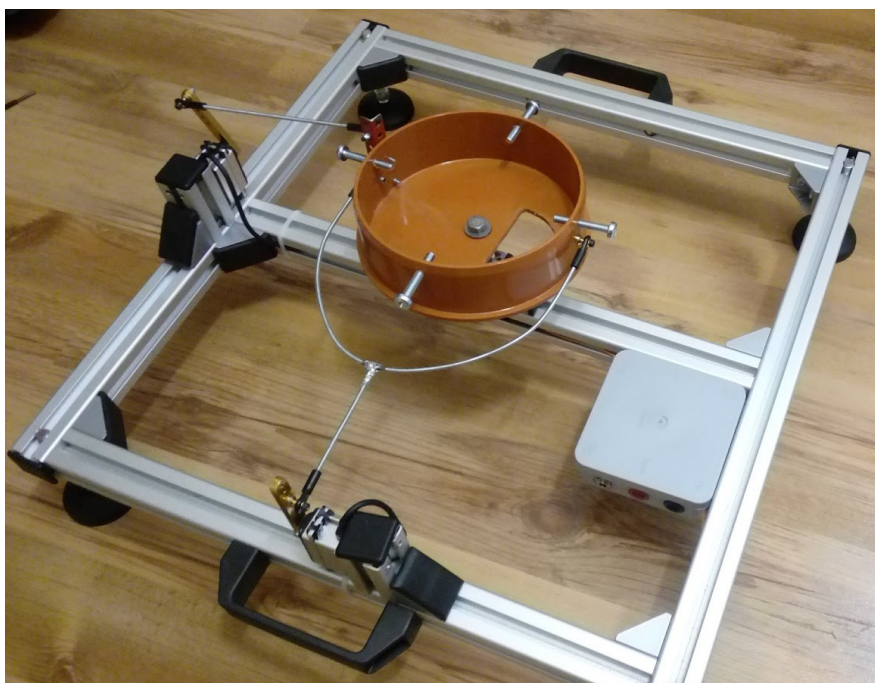
Obrázek 26 Elektronika umístěna uvnitř krabičky



Obrázek 27 Napájecí rozhraní zařízení

3.6 Finální provedení přípravku

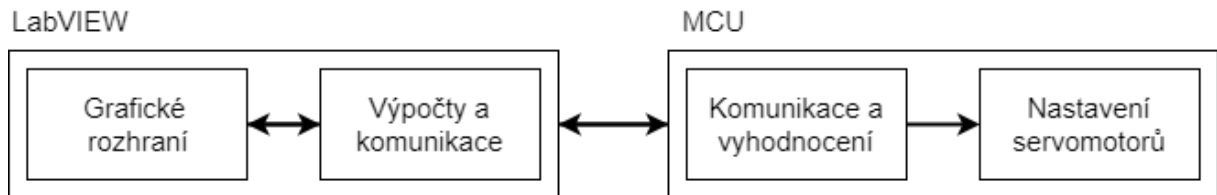
S ohledem na vstupní požadavky byla vytvořena celistvá konstrukce splňující rozličné parametry. Na Obrázek 28 Výsledná konstrukce je vyfocena finální podoba vytvořeného zařízení. Na hliníkovou konstrukci stojících na čtyřech gumových nohách jsou připevněny dva servomotory, které pomocí pákového převodu pohybují s držákem nádoby uchyceného ve středu přípravku na kulovém čepu. Veškerá elektronika je umístěna v krabičce připevněné k hliníkové konstrukci. V elektroinstalační krabici jsou upevněny konektory pro napájení zařízení a komunikaci s řídicím mikroprocesorem. Kabele vedoucí od servomotorů k elektronice jsou vloženy do drážek v hliníkovém profilu, aby byly chráněny proti vnějším vlivům.



Obrázek 28 Výsledná konstrukce

4 Návrh softwarové části

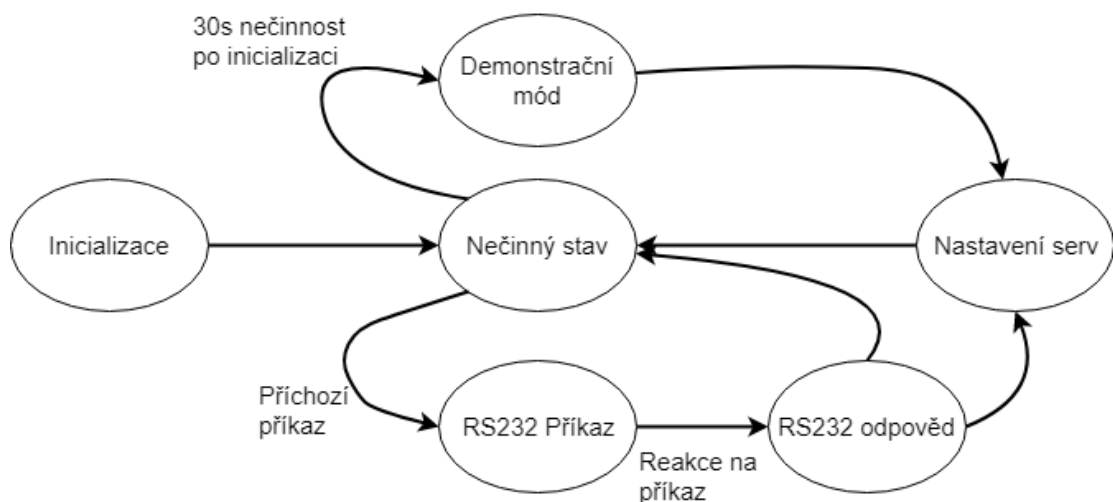
V této části se budeme zabývat návrhem dvou softwarů. Tím prvním bude návrh počítačového rozhraní obsahující uživatelskou část se simulací pohybů přípravku. Druhou částí je samotné ovládání přípravku pomocí servomotorů, pro tyto účely jsme se rozhodli využít mikroprocesor ATmega328 osazen na desce kitu Arduino Nano.



Obrázek 29 Schéma propojení dílčích softwarových částí

4.1 Návrh kódu pro mikroprocesor

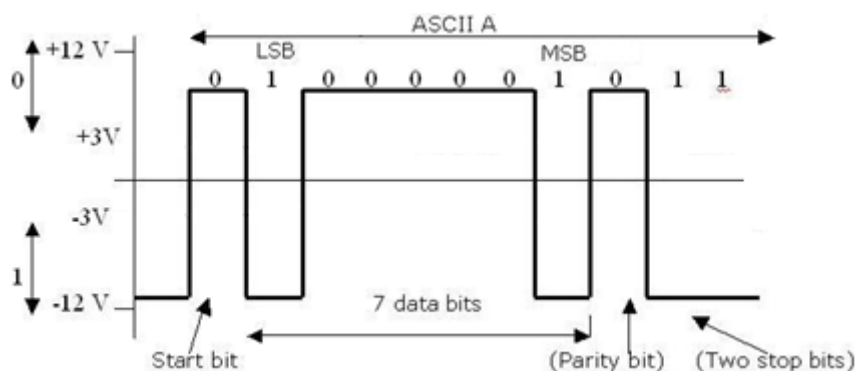
Pro mikroprocesor byl navržen jednoduchý kód, jehož hlavní částí je proces pro příjem příkazů po sériové lince a paralelně běžící proces generující PWM signál pro nastavení servomotorů. Další funkcionalitou kódu je takzvaný „Demonstrační mód“, který se aktivuje automaticky pokud po dobu 30s mikroprocesor neobdrží žádný příkaz po sériové lince. Účelem tohoto módu je prezentace funkčnosti přípravku a může sloužit k prezentačním účelům. V demonstračním módu dochází k pomalému vychylování nádoby v každém směru, takzvaného pohybu do „hvězdy“. Mód je aktivní do té doby, dokud nedojde k jeho přerušení příkazem po sériové lince. Opětovné spuštění je možné pouze restartováním mikroprocesoru.



Obrázek 30 Stavový diagram kódu mikroprocesoru

4.1.1 Komunikační vrstva

Pro nastavování servomotorů využíváme komunikace s počítačem pomocí sériové linky, ta je převáděna pomocí převodní na rozhraní USB, které je podporováno většinou moderních zařízení. Převodník rozhraní je umístěn na samotné desce kitu, není jej tedy nutné připojovat externě.



Obrázek 31 Příklad zaslání znaku „A“ pomocí sériové linky s užitím kontroly paritou [17]

V Tabulka 4 Sada navržených komunikačních příkazů je popsána sada navržených komunikačních příkazů. Příkazy jsou zasílány rychlostí 38400 baudů, jako sada znaků, která je uvnitř procesoru převedena na celočíselný typ. Pro komunikaci jsou podporovány pouze znaky číslic 0 až 9 (0x30 až 0x39 ASCII). Odpověď na korektně provedený příkaz je návrat stejné hodnoty příkazu. Pro nastavení úhlu servomotoru je využito zasílání doby střidy PWM signálu. Tato koncepce byla zvolena pro vyšší přesnost jednotlivých kroků, kdy jsme zařízení v závislosti na použitém typu přepákování přípravku schopno simulovat pohyb v řádu jedné desetiny úhlu.

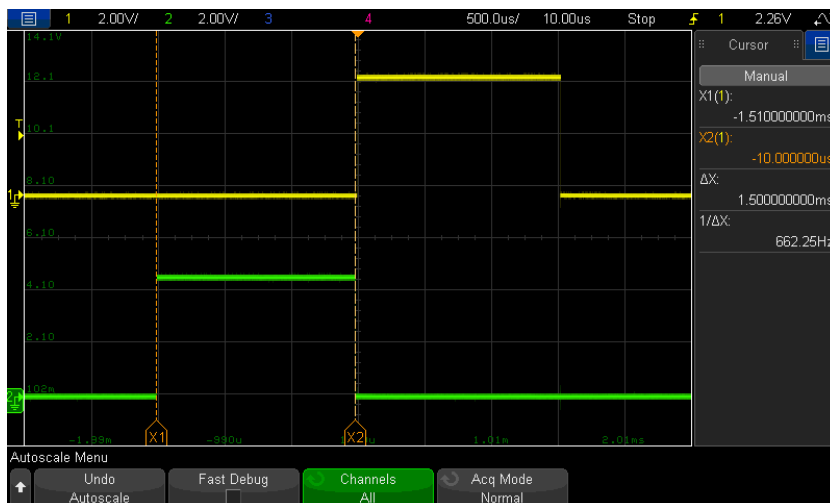
Tabulka 4 Sada navržených komunikačních příkazů

Byte_4	Byte_3	Byte_2	Byte_1	Byte_0	Byte_4	Byte_3	Byte_2	Byte_1	Byte_0	
Příkaz					Odpověď					
5	0	0	0	0	5	0	0	0	0	Ping
4	0	0	0	1	4	0	0	0	1	Nastavení serva 1 do výchozí pozice (90°)
4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	Nastavení serva 0 do výchozí pozice (90°)
3	0	0	0	1	3	0	0	0	1	Vypnutí serva 1
3	0	0	0	0	3	0	0	0	0	Vypnutí serva 0
2	x	x	x	x	2	x	x	x	x	Nastavení pulzu serva 1 <0850- 2150 > us
1	x	x	x	x	1	x	x	x	x	Nastavení pulzu serva 0 <0850- 2150 > us

Error Response					
9	9	9	9	9	Neznámý příkaz
9	9	9	9	8	Nepodporovaný příkaz nebo nevhodná délka příkazu
9	9	9	9	7	Nepodporovaná servo pozice

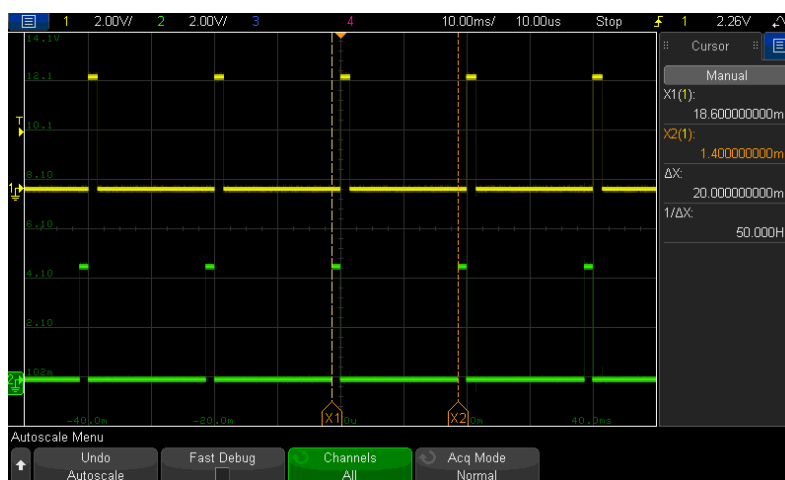
4.1.2 Verifikace softwaru

Software v mikroprocesoru byl otestován, zdali je schopen provést všechny definované příkazy a zároveň, zdali je schopen reagovat na špatně zadaný příkaz. Při testování výstupního PWM signálu jsme volili středovou polohu servomotoru. Měřený kladný pulz signálu byl roven přesně 1500us a byl časově neměnný.



Obrázek 32 Kontrola délky pulzu servomotoru pro středovou polohu

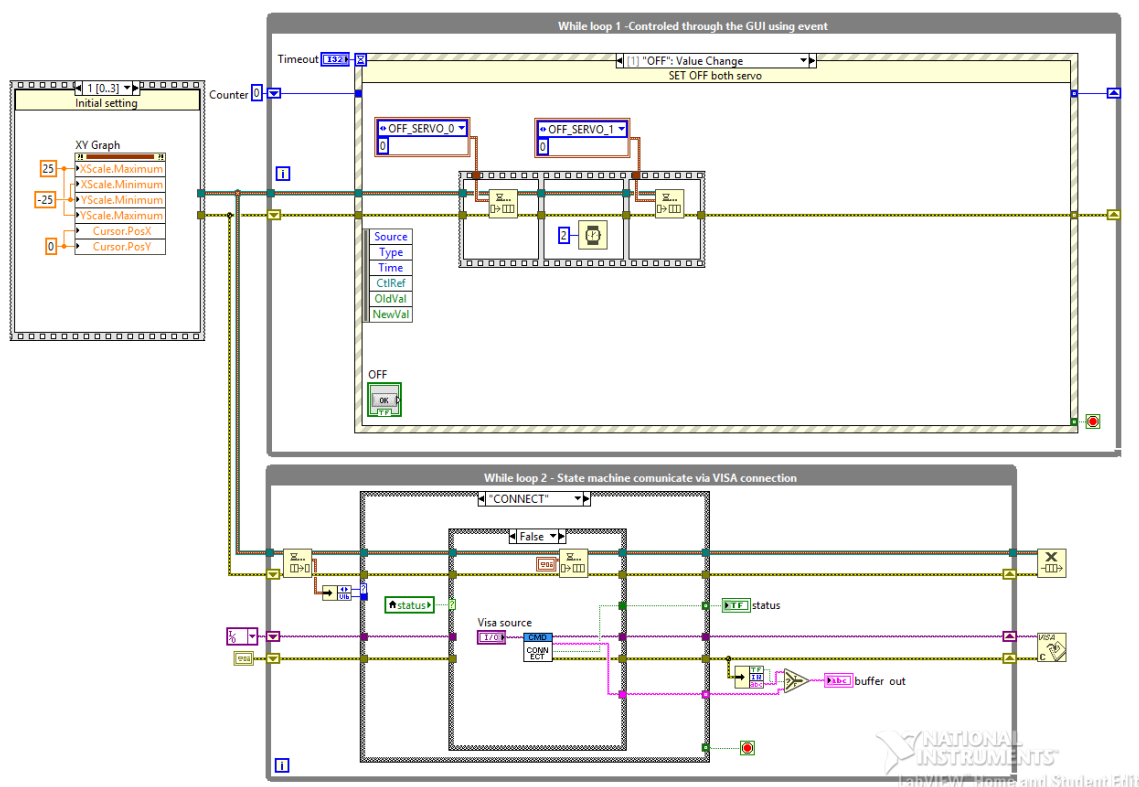
Další podmínkou pro řízení servomotoru bylo zachování frekvence PWM signálu minimálně 50 Hz, v našem případě je elektronika servomotoru schopna detekovat frekvenci PWM až 300 Hz. Takto vysoká frekvence je pro naše účely nepotřebná. Vzhledem k faktu, že při minimální použitelné frekvenci je teoretická doba změny rovna 20ms, což je pro naše účely více než dostatečná hodnota.



Obrázek 33 Kontrola periodicity řídicího signálu

4.2 Návrh kódu v prostředí LabVIEW

Z hlediska návrhu softwarové architektury jsme se vzhledem k rozsahu aplikace rozhodli použít velice jednoduchou softwarovou strukturu Producent – Consumer. Výhodou této struktury je použití dvou „while“ smyček, které nezávisle na sobě umožňují práci se zařízením a uživatelským rozhraním. Přenos dat mezi smyčkami je řešen pomocí fronty dat, která zaručuje plynulý chod celé aplikace. Pokud nedochází k žádné aktivitě v grafickém rozhraní nebo komunikaci se zařízením, jsou smyčky v nečinnném stavu a nevytěžují procesor počítače.

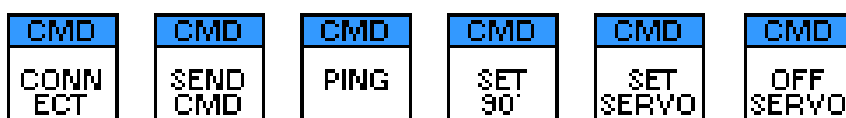


Obrázek 34 Navržený kód v prostředí LabVIEW pomocí struktury Producent – Consumer

Jak je možné vidět v horní smyčce, dochází k nastavování servomotorů pomocí sekvence dvou příkazů. Mezi jednotlivými příkazy je použito zpoždění 2 ms, které je zde z důvodu proudového zatížení zdroje při změně polohy servomotoru pod zatížením. Při nastavení obou servomotorů najednou by mohlo dojít k překročení maximálního proudu dodávaného zdrojem. Pokles napětí by měl být vykompenzován interním kondenzátorem zdroje, bez ovlivnění činnosti mikroprocesoru.

Pro účely tohoto simulačního přípravku byla navržena sada funkcí „VI“, které jsou rozděleny do dvou částí. První částí je realizace komunikace se zařízením a zasílání příkazů po sériové lince

- Connect - Umožňuje navázat připojení se zařízením
- Send Command - Slouží k odeslání specifického příkazu a kontrolu odpovědi zařízení
- Ping - Otestuje připravenost zařízení
- Set Default - Nastaví servomotory do středové polohy
- Set Servo - Nastavení velikosti střidy pro servomotory <850; 2150> us
- Set Off Servo - Vypne řízení polohy servomotorů



Obrázek 35 Vizualizace dílčích VI použitých pro komunikaci se zařízením

do druhé části patří VI pro generaci pohybů a realizaci přepočtů z úhlů z reálných hodnot na strojově zpracovatelná data.

- Flower - Generuje pohyb připomínající listy květiny
- Line - Generuje pohyb v jedné ose
- Spiral - Generuje spirálovitý pohyb
- Star - Generuje pohyb připomínající hvězdicí
- Circle - Generuje kruhový pohyb
- Move to Position - Umožňuje plynulý pohyb servomotorů mezi dvěma pozicemi
- Conversion Array - Slouží k přepočtu vygenerovaných pohybů na strojová data
- Real to Servo - Přepočet mezi reálnými hodnotami (°) na strojové



Obrázek 36 Vizualizace dílčích VI použitých pro generování a práci s pohyby přípravku

Podrobnější programátorské informace jsou popsány v kontextové nápovědě pro každé dílčí VI. Samotné VI budou dále využity díky jejich kompatibilitě s vývojovým prostředím TestStand vyvinutém společností National Instruments s.r.o. k automatickému testování.

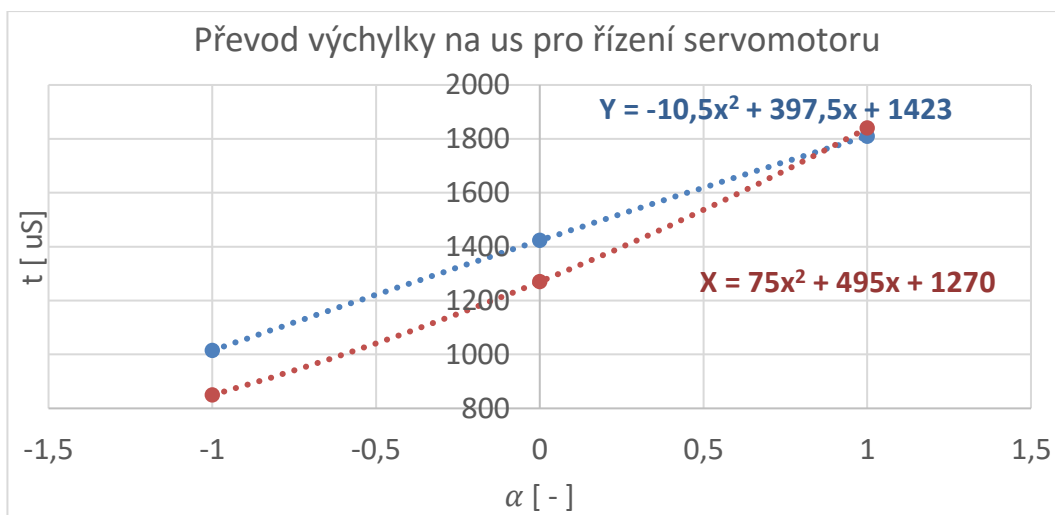
4.3 Kalibrace pohybů

Při použité konstrukci nejsou pro obě osy použité totožné pákové převody z důvodu mechanického umístění pákových mechanismů, tak i z důvodu jednodušší konstrukce. Výsledkem těchto řešení je, že pákové převody nejsou zcela lineární a je nutné je linearizovat.



Obrázek 37 Experimentální seřízení přípravku do výchozích pozic

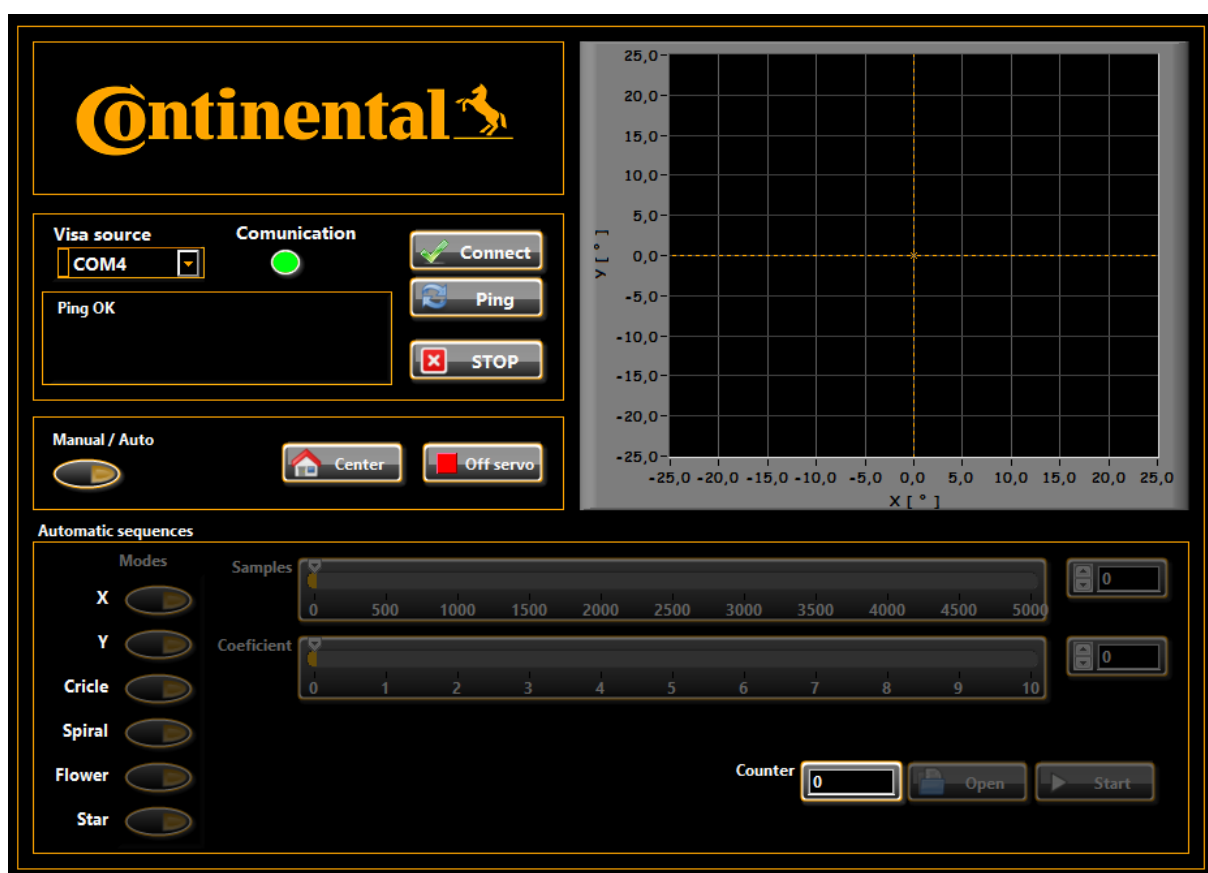
Pomocí experimentální použití mobilního gyroskopu jsme schopni v manuálním režimu softwaru nastavit přípravek do středových a krajních poloh. Pro tyto polohy jsme odečetli hodnoty střídý nastavených v servomotorech. Díky tomuto pokusu již známe tři body, kterými musí funkce procházet. Pro osu X a Y jsme vypočetli polynomicke funkce druhého řádu, které nejlépe kopírovaly samotný průběh a byly schopny zcela přesně pokrýt veškeré polohy přípravku.



Obrázek 38 Graf aproximačních funkcí pohybů přípravku

4.4 Grafické rozhraní

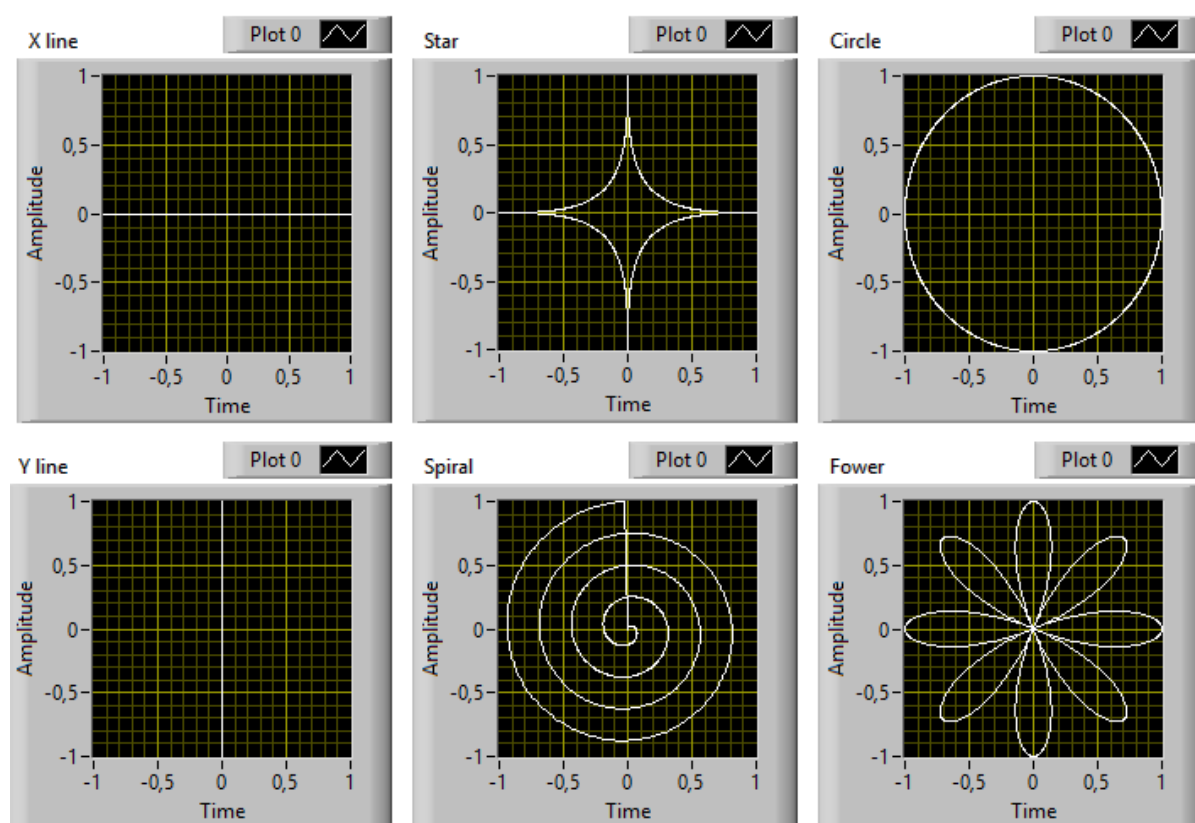
Grafické rozhraní vyvinuté pro tuto aplikaci umožňuje uživateli pohybovat se v automatickém a manuálním režimu. Tyto režimy jsou uživateli zpřístupněny po úspěšném navázání komunikace se zařízením. V manuálním režimu jsou k dispozici dvě tlačítka, jedno pro vypnutí servomotorů a druhé pro nastavení celého přípravku do středové – vodorovné polohy. Součástí tohoto režimu je také možnost nastavit manuálně náklon nádoby pomocí kurzoru v XY grafu. Druhou možností je použití automatického režimu, kde jsou pro uživatele připraveny sekvence automatických pohybů. Po zvolení typu pohybu lze u některých sekvencí ještě dále ovlivnit tvar sekvence nastavováním koeficientu pohybu. Posledním krokem je nastavení rychlosti s jakou má docházet k nastavování přípravku. Pro všechny tyto úkony je generována vizualizace pohybu v okně XY grafu.



Obrázek 39 Navržené grafické uživatelské rozhraní

4.5 Návrh automatických sekvencí pohybu

Pro automatické pohyby přípravku byla navržena sada základních pohybů. Jejich vizualizaci lze vidět na Obrázek 40 Příklady možných automatických pohybů generovaných pomocí softwaru. Mezi nejjednodušší pohyby patří pohyb přípravku v jedné ose. Komplikovanějším automatickým pohybem je pak pohyb po kružnici. Poslední tři naimplementované pohyby umožňují uživateli jistou míru individualizace, a to prostřednictvím nastavení koeficientu generovaného pohybu. Například pro spirálovitý pohyb lze určit množství zatočení spirály, pro pohyb kytice pak množství listů květu. Ke všem pohybům byla do softwaru ještě implementována funkce pomalého přesunu z výchozí vodorovné pozice počáteční polohy automatického pohybu. Funkce zaručuje, aby nedocházelo k přílišnému šubnutí s přípravkem a vylití testovací kapaliny.



Obrázek 40 Příklady možných automatických pohybů generovaných pomocí softwaru

5 Zhodnocení dosažených výsledků

Navržená konstrukce splňuje základní definované požadavky. Její hliníková konstrukce působí velice bytelně a stabilně. S konstrukcí jsou pevně spojeny servomotory pomocí šroubů, tak aby nedocházelo ke ztrátám energie v uložení. Veškerá elektronika je umístěna do elektroinstalační krabice a tím je zaručena ochrana proti nahodilému poškození zapojení. Kabeláž servomotorů je zasazena do drážek hliníkové profilu, aby nezavazela a současně nemohlo dojít k jejímu poškození. Elektrické spojení mezi elektroinstalační krabicí a servomotorem je řešeno pomocí konektoru, který umožňuje jednoduché odpojení a demontáž servomotoru.

Navržený software mikrokontroleru umožňuje jednoduchou kontrolu řízení pomocí navržených komunikačních příkazů. Koncepce příkazů byla navržena, aby bylo zasíláno co nejméně dat po sériové lince. Zařízení obsahuje pouze malé množství příkazů, a tak byla použita koncepce zaslání pěti bajtů. První bajt obsahuje instrukci, poté zbylé čtyři bajty slouží k nastavení střídy řízení servomotoru.

Použitý software byl v první řadě vyvíjen tak, aby jej bylo možné snadno implementovat do testovacího prostředí firmy National Instruments s.r.o., Test Stand využívaného při automatických testech zařízení. Výsledné grafické rozhraní pak už slouží pouze jako nádstavba pro demonstraci a manuální, popřípadě poloautomatické testování zařízení.

6 Závěr

Vytvořené zařízení splnilo základní předpoklady, avšak neslouží přímo k simulování zrychlení automobilu, nýbrž pouze k simulaci náklonu kapaliny v nádrži s AdBlue. Tento princip byl zvolen z důvodů nutnosti výroby komplikovaného a rozměrově velkého zařízení pro samotnou simulaci zrychlení. Byla tudíž použita jednodušší metoda pro simulaci inklinace hladiny kapaliny, ke kterému dochází při působení sil v pohybu automobilu. Tato možnost je plně dostačující pro testovací účely a umožňuje ověřit při jakých úhlech naklonění kapaliny vůči senzoru je schopen senzor měřit relevantní data. Dále umožňuje přípravek ověřit, zdali nedochází k falešným odrazům ultrasonického signálu a o elementy senzoru, popřípadě kraje samotné nádoby.

Z uživatelského hlediska se jedná o koncepčně jednoduchý přípravek, umožňující výměnu typu senzoru pomocí navrženého držáku s použitím čtveřice upevňovacích šroubů. Řízení přípravku je realizováno komunikačním kabelem USB, obstarávajícím oboustrannou komunikaci mezi počítačem a zařízením. Vytvořené podprogramy pro navázání komunikace, kalibrace a řízení přípravku jsou vytvořeny elementárně, tak aby byly jednoduše implementovatelné do testovacího prostředí. Každá z vytvořených funkcí je doplněna kontextovou nápovědou informující o přesných požadavcích pro použití dané funkce.

Do budoucna je možné zdokonalit přenos síly na testovací nádobku, nahrazením pákových převodů, použitím lineárních motorů. Lineární pohon umožňuje přímý přenos síly na zařízení a současně si vystačí s jednodušším přepákováním. Samotná hliníková konstrukce umožňuje značnou variabilitu, pro nahrazení servomotorů je potřeba pouze upravit uchycení akčních členů.

Použitá literatura

- [1] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [2] BERGER, Arnold. Embedded systems design: an introduction to processes, tools, and techniques. Lawrence: CMP Books, c2002. ISBN 1-57820-073-3.
- [3] MARTINEK, Radislav. Senzory v průmyslové praxi. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-114-4.
- [4] [ISO 22241-1]. [cit. 2018-04-24] Diesel engines -- NOx reduction agent AUS 32 -- Part 1: Quality requirements, International Organization for Standardization, 2006
- [5] AdBlue. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2001-, 2. 6. 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/AdBlue>
- [6] Continental AG. Ostrava [online]. 2018 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://continental.jobs.cz/detail-lokality/ostrava/>
- [7] SAJDL, Jan. AdBlue [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/adblue>
- [8] HAVEL, Milan, Vít VEBR a Petr VÁLEK. Oxidy dusíku [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://arnika.org/oxidy-dusiku>
- [9] JSP s.r.o. Ultrazvukové hladinoměry – Principy ultrazvukových hladinoměrů [online]. [cit. 2018-04-24] Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorii/snimace_hladiny/teorie-hladina/ultrazvukove-hladinomeru/principy-ultrazvukovych-hladinomeru.html
- [10] KADLEC, Karel. Provozní snímače hustoty kapalin. Snímače a měřicí technika [online]. 1.1.2017, 5 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42735.pdf
- [11] Movement simulator platform [online]. [cit. 2018-04-24] Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/mevea/product-64809-654939.html>
- [12] Hliníkový a konstrukční systém [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <http://www.alvaris.eu/cz/hlinikovy-konstrukcni-system/profilova-rada-8/profil-8-30x30>
- [13] Přímé kulové klouby [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.plynove-pruziny.eu/cs/34-prime-kulove-klouby>
- [14] PALÁČEK, Josef. Umíte si dobře vybrat servo [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.jpmodels.cz>
- [15] Product H6200 [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.spektrumrc.com/Products/Default.aspx?ProdId=SPMSH6200>
- [16] Arduino Nano Product specification [online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>
- [17] GOFTON, Peter W. Sériová komunikace. Přeložil Bohumil KVAPIL. Praha: Grada, 1995. ISBN 80-7169-131-3.
- [18] BILÍK, Petr. Virtuální instrumentace II. Učební text. Ostrava: VŠB TU, 2012.

Seznam příloh

A	Obsah CD	I
---	----------------	---

A. Obsah CD

Obsah přiloženého CD.

- Zdrojový kód pro vývojový kit Arduino (.c)
- Aplikace se zdrojovými kódy v programovacím jazyku LabVIEW (.vi)
- 3D model a výkres hliníkové konstrukce simulátoru (.iam, .pdf)
- Dokument závěrečné práce (.pdf)